ESPECIACION CROMOSOMICA EN PRIMATES

INVESTIGACION y CIENCIA

AGOSTO 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MUERTE APARENTE PREVENTIVA

CREACION DE ANTIMATERIA FRIA

CONVERSACION AUTOMATICA

COMO Y DONDE SE ORIGINO EL MAIZ

LA APARICION DE LA MENTE MODERNA

¿VARIAN LAS CONSTANTES FISICAS?

FELIX TISSERAND Y EL EFECTO SOMBRA





Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Agosto de 2005

Número 347









1	2	3	4	5	6	7
11	12	13	14	15	16	17
21	22	23	24	25	26	27
31	32	33	34	35	36	37
41	42	43	44	45	46	47







DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
Manuel Martín Martín
Teléfono 670 236 715
e-mail: publicidad-ic@hotmail.com

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *Muerte aparente preventiva*; Ramón Pascual: *Variación de las constantes*; Luis Bou: *Decidir ante un futuro incierto* y *Creación de antimateria fría*; José Chabás: *Félix Tisserand y el efecto sombra*; Carlos Lorenzo: *La aparición de la mente moderna*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

EFECTO PLACEBO. «La sociedad nunca ha distinguido de forma tajante entre médicos y hechiceros. Para muchos resulta inquietante saber que el médico no es omnisciente en su terreno. Cuando el paciente espera o pide una prueba tangible de aptitud terapéutica, lo más sencillo (y prudente) para todos los implicados suele ser la receta de una píldora o un jarabe inocuos. La famosa ilegibilidad de la letra escrita en las recetas impide al paciente curioso siquiera adivinar la naturaleza del medicamento. Para protegerse de la posibilidad de que éste pregunte al farmacéutico acerca del contenido de la receta, los médicos deben evitar el azúcar blanco y demás ingredientes conocidos. Nombres tales como tintura de valeriana amoniacal pueden revelarse sin arruinar los efectos psicológicos.»

...cien años

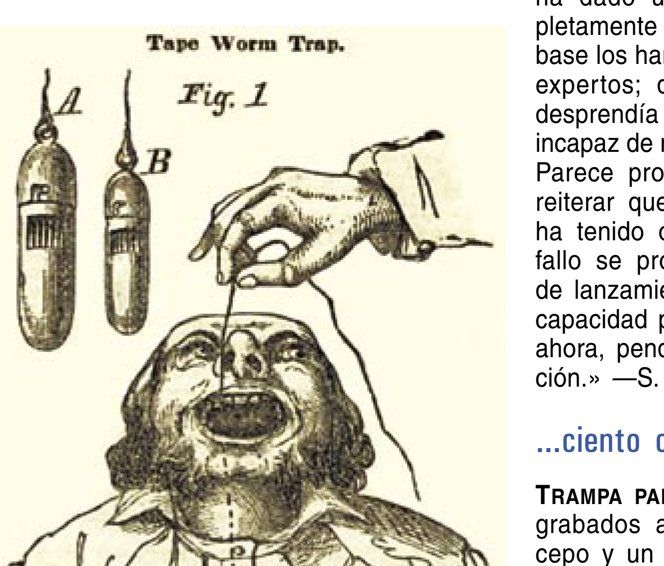
GALVESTON SUBE. «La terminación del gran dique portuario de Galveston marca la culminación feliz de una de las más singulares y gigantescas empresas de ingeniería de los últimos años: un muro de hormigón macizo de más de siete kilómetros de longitud y más de cinco metros de altura, y la subida de la altitud de la ciudad hasta el nivel de la cima del dique. El maravilloso coraje de los galvestonianos se comprende mejor si tenemos en cuenta que la gran tormenta del 8 de septiembre de 1900 se cobró 8000 vidas y destruyó propiedades por valor de más de veinte millones de dólares; la fe en el rápido crecimiento de la ciudad sufrió una conmoción tan fuerte, que cinco años no han bastado para restaurar la confianza pública. El cambio de altitud de la ciudad hizo necesario alzar el nivel de 2156 casas.»

ESCOPOLAMINA. «En lugar del cloroformo o cualquiera de los otros anestésicos conocidos, puede emplearse un alcaloide vegetal. La idea de esta sustitución se debe al doctor Schneiderlin, de Baden. ¿Qué llevó a ese cirujano a experimentar con esa sustancia? No lo sé, pues el poder para producir anestesia general no podía inferirse, a priori, de sus propiedades conocidas. La escopolamina, el alcaloide recomendado, se extrajo de *Scopolia japonica*, una herbácea perenne, popularmente conocida como belladona japonesa.»

EL AEROPLANO DE LANGLEY. «Los experimentos acometidos por la Institución Smithsoniana sobre el aeroplano, o máquina voladora, capaz de transportar un hombre, se han suspendido por falta de fondos para reparar los defectos del mecanismo de lanzamiento. La información acerca de estos experimentos publicada en la prensa ha dado una impresión completamente errónea, sobre cuya base los han juzgado incluso los expertos; de los artículos se desprendía que la máquina era incapaz de mantenerse en vuelo. Parece procedente subrayar y reiterar que la máquina nunca ha tenido ocasión de volar; el fallo se produjo en sus raíles de lanzamiento y, por tanto, su capacidad para volar sigue, por ahora, pendiente de comprobación.» —S. P. Langley

...ciento cincuenta años

TRAMPA PARA PARÁSITOS. «Los grabados adjuntos ilustran un cepo y un proceso patentados para extraer solitarias del estómago e intestinos humanos. La ilustración muestra la mano del operador tratando de pescar el parásito. *A* y *B* representan dos tipos de trampas. El paciente se somete primero a un riguroso ayuno durante varios días. El cepo, cebado con cualquier alimento nutritivo —un trozo de queso, por ejemplo—, es entonces ingerido. Merced a una leve sacudida, la solitaria desplaza las finas puntas de la horquilla del cepo y queda así traspasada y atrapada. Luego se extrae el gusano, tirando hacia arriba con sumo cuidado, para no romperlo.»

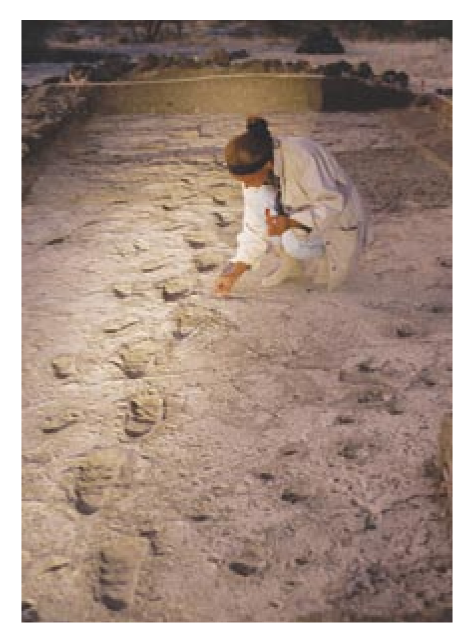


Cepo para solitarias, con cebo y listo para usar, 1855.

APUNTES

PALEONTOLOGIA

Dudas sobre Laetoli



Se ha estado creyendo que el *Australopithecus afarensis* imprimió las huellas de Laetoli, en Tanzania. Pero su pie quizás era demasiado plano.

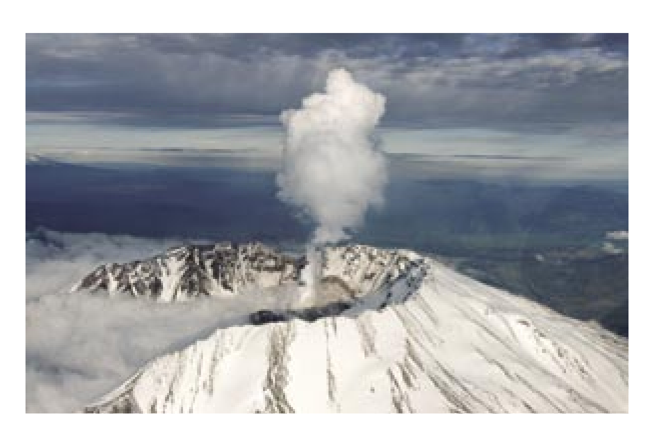
En 1978, el equipo de Mary Leakey descubría en Laetoli, Tanzania, una sucesión de pisadas humanas de hace 3.600.000 años preservadas en ceniza volcánica. Se revelaba así que el linaje humano andaba erguido antes de que empezara a tallar útiles líticos y desarrollara un cerebro voluminoso. Había bastante acuerdo en que las pisadas correspondían a individuos de la especie *Australopithecus afarensis,* en la que se integra Lucy. Tal atribución se apoyaba en una doble razón: los fósiles de esa especie se recuperaron en la zona y la única reconstrucción aportada del pie de ese homínido resultaba compatible con la morfología de las ictitas. Los paleontólogos William Harcourt-Smith y Charles E. Hilton acaban de poner en duda la validez del segundo motivo, es decir, la exactitud de la reconstrucción. Las huellas revelan que quien las dejó presentaba un arco del pie de tipo humano, arco que aparecía también en el pie reconstruido de *A. afarensis*. Hasta ahí, todo correcto. Sin embargo, objetan Harcourt-Smith y Hilton, tal reconstrucción se efectuó en realidad a partir de un repertorio de huesos procedentes de *A. afarensis* (de hace 3.200.000 años) y de *Homo habilis* (de hace 1.800.000 años). Y justamente el navicular, uno de los huesos con que se determinó el arco del pie, pertenecía a *H. habilis*, no al australopitecino.

Para abordar la cuestión los dos investigadores comenzaron por comparar las pisadas del hombre moderno sobre la playa con dos series de ictitas. Del análisis resultó que las huellas fósiles pertenecen a una deambulación bípieda muy similar a la del hombre moderno. Luego, estudiaron los huesos naviculares de *A. afarensis, H. habilis*, chimpancés y gorilas. Las dimensiones del hueso navicular de *H. habilis* se asemejan a las de nuestra especie. Por el contrario, el hueso de *A. afarensis* recuerda al de los simios de pie plano; resulta improbable que su arco se pareciese al nuestro y que, por ende, anduviere como nosotros o como los homínidos de Laetoli. Idea que no comparte C. Owen Lovejoy, experto en bipedismo, para quien la alineación de todos los dedos del pie sin exclusión del austrolopiteci-no constituye una prueba de presencia de arco. Y aun cuando hubiera carecido del mismo, ello no implicaría incapacidad para la deambulación humana: muchas personas tienen los pies planos. Pero si *A. afarensis* no fue quien dejó las huellas, quizá las imprimiese *A. anamensis*, del que se sabe poco, o una especie aún no descubierta.

—Kate Wong

GEOFISICA

La reconstrucción del volcán Santa Helena



El monte Santa Helena va arrojando poco a poco lava que rellenará su cráter. La vista se tomó el 8 de junio de este año.

A mediodía del 2 de octubre de 2004, el volcán Santa Helena emitió un penacho de vapor; poco después se registraron temblores de baja frecuencia. El magma se estaba moviendo bajo tierra. Se publicó una alerta y se prohibieron los vuelos cerca del volcán. Dos días después, finas capas de ceniza se depositaban incluso cien kilómetros al nordeste, pero no hubo erupción que recordase ni de lejos a la catastrófica de 1980. Para el seis de octubre, el grado de alerta se había rebajado ya. La actividad volcánica ha ido disminuyendo desde entonces, pero no extinguido; menudean las emisiones de vapor y ceniza acompañadas de temblores (en marzo, una explosión proyectó cenizas casi a once kilómetros de altura). Dada la estructura actual del volcán, queda poco sitio para que el magma se acumule en la medida en que lo hizo un cuarto de siglo atrás. Al encontrar el magma salidas, la actividad decrece y se va formando una nueva cubierta de lava en el cráter, larga y estrecha, que se alza más de 400 metros por encima del lecho del cráter. La lava se va incorporando al domo a una tasa de dos metros cúbicos por segundo. Gracias a la lentitud del proceso, los gases escapan y las piedras se depositan sin estallar. Según el volcanólogo John Eichelberger, el Santa Helena está siguiendo los mismos pasos que el Bezymiani, volcán de Kamchatka que estalló en 1956 con consecuencias parecidas a la explosión de 1980 del Santa Helena (al que se le desplomó toda la cara este). Desde entonces, el nuevo cráter se ha rellenado casi por completo y Bezymiani ha vuelto a su aspecto anterior. Puede que también el Santa Helena esté recuperando su anterior conformación. Sólo cuando su reconstrucción haya vuelto a dejar sitio para una gran burbuja de magma, podrá provocar otra explosión gigantesca.

—Krista West

KENNETH GARRETT *National Geographic Image Collection (arriba)*; JOHN PALLISTER/USGS/CASCADES VOLCANO OBSERVATORY *(abajo)*

CONDUCTA ANIMAL
Esponjas y delfines



En la australiana bahía de los Tiburones, los biólogos han observado delfines salvajes, en su mayoría hembras, que se protegen el hocico con esponjas marinas cuando hozan en el lecho marino en busca de peces. Aunque los científicos pensaron que se trataba de una destreza aprendida, no podían descartar que tuviera una causa genética directa. Ahora, basándose en muestras de ADN de 13 delfines "esponjeros" y 172 que no lo son, se ha visto que todos los esponjeros están emparentados y deben de compartir un antepasado reciente común, pero no encajan en un patrón en el que un gen pudiera ser la causa de su habilidad. Por tanto, lo más probable es que las hijas aprendan ese comportamiento de sus madres.

—J. R. Minkel

Cultura acuática: Un delfín hembra de dos años se protege el hocico con una esponja, comportamiento aprendido de su madre.

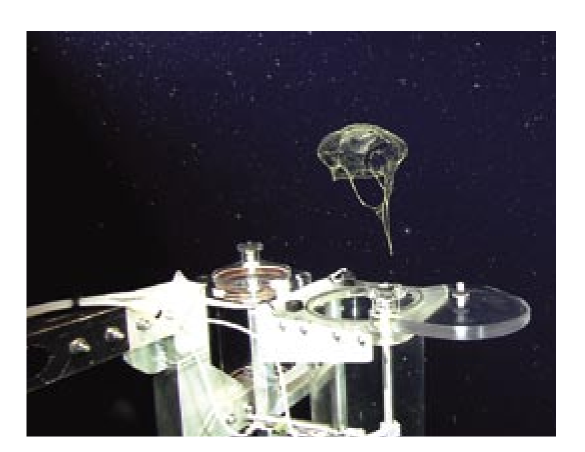
MEDICINA
Los peligros de la estadística... y de los expertos

En los últimos tiempos han menudeado las polémicas en torno a útiles estadísticos. Hemos asistido a disputas sobre la gráfica de temperaturas, la evaluación del número de muertes violentas en Irak, la comisión de fraudes en diversas elecciones, los efectos de la obesidad en la salud e incluso la eficacia de la virginidad en la caída de las enfermedades venéreas. En algunos de estos casos las técnicas estadísticas se han apurado hasta el límite de sus posibilidades, lo que deja margen para incertidumbres y análisis interesados. Llamativo por demás es lo que ha sucedido en el Reino Unido. Roy Meadow definió hace treinta años en *The Lancet* un "síndrome de Munchausen por persona interpuesta": algunas madres inducían dolencias, que parecían naturales, en sus hijos pequeños para llamar la atención sobre sí mismas. Su declaración en el juicio contra Sally Clark, madre a la que se le habían muerto súbitamente dos niños, influyó en la condena de la infortunada. Tras años de prisión, fue absuelta, lo mismo que otras mujeres con dos hijos muertos cada una en cuyo juicio intervino Meadow, al considerarse que éste indujo a error a jurados y tribunales. La probabilidad de dos muertes súbitas en una familia acomodada donde no se fuma era, contó Meadow en el juicio de Clark, de uno en 73 millones, cifra a la que llegaba elevando al cuadrado la probabilidad de una sola muerte súbita. Hasta la Real Sociedad de Estadística intervino para explicar cuán erróneo era semejante cálculo. Parece que ciertas familias son propensas a ese tipo de muertes: si ya han sufrido la muerte súbita de un niño, tienen una probabilidad de en torno al uno por cien de que muera de la misma forma otro. Y sobre todo: una vez ha ocurrido un suceso de baja probabilidad, sólo importan las probabilidades relativas de las causas posibles de ese suceso. El homicidio es aún más improbable que la muerte súbita. Con una aplicación simplificada del teorema de Bayes de las probabilidades condicionales, se ha estimado que la probabilidad de que las madres condenadas sean inocentes supera el sesenta por ciento.

ECOLOGIA MARINA
Mucosidades alimenticias

Mucho tiempo llevan los biólogos intentando desentrañar una cuestión espinosa: ¿Cómo se las arreglan los organismos bentónicos para obtener los nutrientes que necesitan? La cantidad medida de partículas orgánicas que sedimentan no parecía bastar para el sustento de los organismos de las profundidades. El secreto de su alimentación quizá se encuentre en una mucosidad. Del tamaño de los renacuajos, los larváceos gigantes, medran en unas delicadas casas de moco de más de un metro de ancho que les sirven para capturar comida. Cuando uno de esos habitáculos se llena demasiado, el larváceo lo abandona y construye otro. Bruce Robinson y sus colaboradores, del Instituto de Investigaciones del Acuario de la Bahía de Monterrey en Moss Landing, se han pasado 10 años recogiendo habitáculos de larváceos y grabando en vídeo la construcción y el abandono de esas moradas. Los larváceos se construyen una casa nueva cada día, y las viejas que se van al fondo responden de alrededor de la mitad del carbono de la lluvia de partículas orgánicas.

—Charles Q. Choi

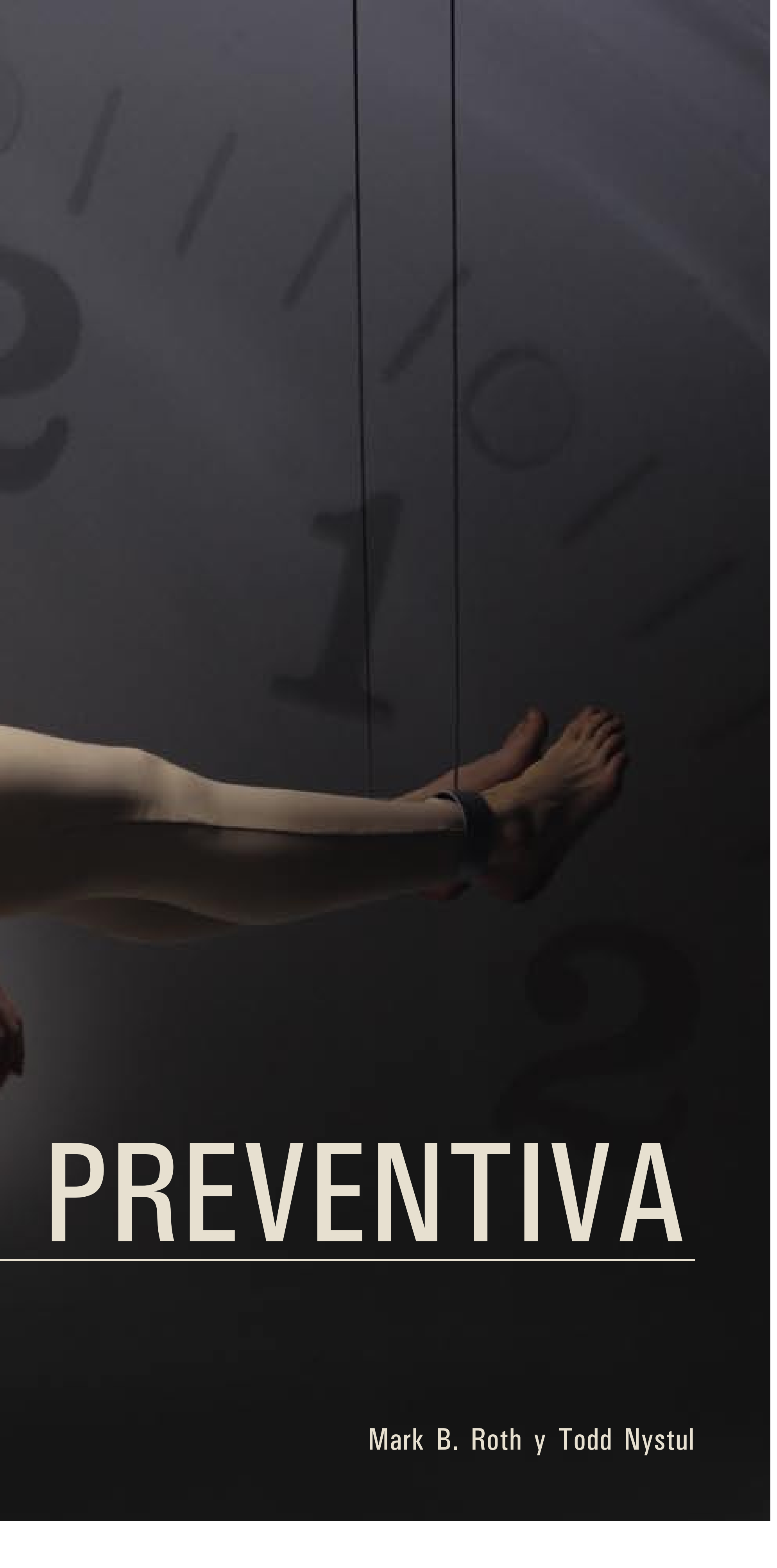


Una cámara de muestreo instalada en un sumergible, se prepara para recoger el habitáculo de un larváceo en su caída hacia el lecho marino.



MUERTE APARENTE

Poner el cuerpo humano en “modo de espera” protegería a los individuos gravemente heridos y mantendría la integridad de los órganos que, extraídos del donante, no se han trasplantado todavía



PREVENTIVA

Mark B. Roth y Todd Nystul

La posibilidad de "congelar" la vida humana en un estado reversible de muerte aparente viene cautivando a los novelistas desde hace tiempo. En los relatos de ficción, los protagonistas "duermen" durante siglos de viaje interestelar o cataclismos terrestres y, luego, despiertan, inalterados por el paso del tiempo. Son relatos intrigantes, aunque inverosímiles desde el punto de vista biológico. Nada indica que el hombre pueda alterar el ritmo de su desarrollo vital. No podemos detener la actividad de nuestras células, ni dejar de respirar más de unos minutos sin que se produzca un daño grave de órganos vitales.

En la naturaleza, abundan sin embargo, organismos que sí pueden —y lo hacen— detener de forma reversible sus procesos biológicos esenciales, en algunos casos durante años. Los términos quiescencia, letargo o hibernación designan distintos grados de un mismo fenómeno: la muerte aparente, una reducción drástica de la producción de energía (metabolismo) y del consumo de la misma (actividad celular). Y lo que es más, en ese estado los organismos oponen una extraordinaria resistencia a las temperaturas extremas, a la falta de oxígeno, al daño físico y a otros factores de estrés ambiental.

Dejando aparte los escenarios de la ciencia-ficción, si el cuerpo humano pudiese ponerse en dicho estado latente, las consecuencias serían, sólo desde el ámbito médico, enormes. Pensemos en los trasplantes. Los órganos se tornan muy vulnerables en cuanto se extraen del donante; si pasa demasiado tiempo antes del trasplante, dejan de funcionar. El corazón y los pulmones, por ejemplo, sobreviven fuera del cuerpo durante un máximo de seis horas; el páncreas y el riñón no duran más de un día. El éxito del traslado de los órganos explantados (extraídos) depende, pues, de la velocidad. Por eso, muchos receptores compatibles potenciales deben descartarse por la sencilla razón de que no hay tiempo para transportar el órgano antes de que se deteriore. Y mientras decenas de miles de trasplantes de órganos se llevan a cabo con éxito cada año, las prisas llevan en ocasiones a errores que se habrían evitado de haber dispuesto de más tiempo.

CARY WOLINSKY; *CORBIS* (*reloj*); JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración*)

Si esos órganos tan valiosos pudiesen ponerse en un estado de letargo, se prolongaría su viabilidad días o incluso semanas. Los equipos médicos de emergencia aplicarían también esta técnica para ganar tiempo en el caso de accidente: provocar un estado de muerte aparente en un paciente gravemente herido retrasaría la degradación de los tejidos, lo que facilitaría la reparación de las lesiones.

Los estudios llevados a cabo en nuestro laboratorio del Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas en Seattle, así como los realizados por otros investigadores, han demostrado la inducción de estados de seudohibernación en animales no hibernantes. Además, mientras se encuentran en "modo de espera", no acusan tanto la falta de oxígeno y otros efectos propios de la hemorragia, como si el letargo les protegiera. El fenómeno plantea una cuestión excitante: ¿y si la muerte aparente fuera viable también en humanos? De hecho, los métodos que hemos usado para inducirla en animales de laboratorio y en tejidos humanos sugieren que esta capacidad de detener de forma reversible los relojes biológicos se encontraría latente en organismos muy diversos; posibilidad que se apoyaría en mecanismos que hunden sus raíces en los albores de la vida microscópica sobre la Tierra.

Ralentizar para sobrevivir

Los organismos capaces de detener, en menor o mayor grado, la actividad celular suelen hacerlo en respuesta a un factor de estrés ambiental; se mantienen "en espera" hasta que dicho factor desaparece. Una semilla de una planta en desarrollo, por ejemplo, permanece durmiente en el suelo durante años hasta que las nuevas condiciones favorecen la germinación. De forma similar, los embriones del camarón de agua salada *Artemia franciscana* pueden vivir durante más de cinco años sin alimento, ni agua ni oxígeno: entran en un estado de quiescencia —semejante al de la semilla— en el que se produce un estancamiento virtual de la actividad celular. Si se les vuelve a exponer a su medio natural, reemprenden con normalidad el desarrollo hasta la edad adulta.

Existen varios estados de muerte aparente. Van desde aquellos cuya actividad biológica se suspende —cesa todo movimiento en el interior de las células visible al microscopio— hasta aquellos otros cuya actividad celular prosigue, aunque a un ritmo ralentizado de golpe. Hay animales que, en edad adulta, reducen al mínimo mediante la hibernación la necesidad de alimento y aire durante largos períodos, su respiración y ritmo cardíaco se tornan casi imperceptibles, su temperatura corporal cae hasta valores próximos a la congelación y sus células apenas consumen energía. Las ardillas terrestres y decenas más de especies de mamíferos pasan cada año los meses del invierno en ese estado. Ranas, salamandras, peces y otros vertebrados buscan refugio durante los calurosos meses estivales en un estado de estivación.

Resumen/Un alto en el camino

- Muchos organismos ralentizan o suspenden sus procesos biológicos. El estado de letargo les proporciona protección frente a la falta prolongada de oxígeno y otros factores de estrés ambiental que, en condiciones normales, resultan letales.
- La oxigenación deficiente constituye una de las principales causas de daño y muerte tisular en órganos explantados de donantes y en personas que sufren hemorragia o embolias. La restauración inmediata del suministro de oxígeno a esos tejidos no siempre resulta posible. El bloqueo del poco oxígeno que queda disponible, en cambio, induce un protector estado de muerte aparente en ciertas especies. Podría resultar eficaz también en tejidos humanos o en individuos gravemente heridos.
- El sulfuro de hidrógeno, sustancia que nuestro cuerpo fabrica de forma natural, bloquea en las células el uso del oxígeno y provoca la muerte aparente en ratones. Quizá constituya un regulador natural de la producción celular de energía, capacitado para inducir un estado de letargo protector en humanos.

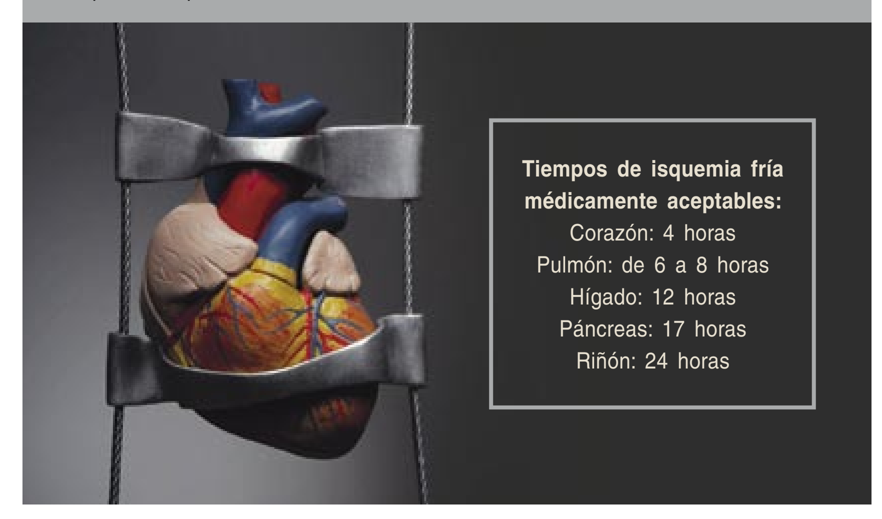
Esta capacidad de sobrevivir a una anoxia prolongada —habilidad basada en la caída drástica de producción de energía— ofrece un marcado contraste con el metabolismo humano. El hombre depende de un suministro de oxígeno rigurosamente estable: nuestras células lo necesitan para mantener su producción constante de energía. Cuando los niveles de oxígeno en nuestros tejidos caen por debajo de un valor determinado, las células sufren un daño isquémico que desemboca en la muerte tisular. Por ello la isquemia es a menudo la causa subyacente de la mortalidad producida por ataques cardíacos, derrames cerebrales u otras lesiones que privan a los tejidos de sangre y, por tanto, de oxígeno, aunque sea sólo por un breve intervalo.

Queda mucho por saber sobre los mecanismos moleculares que en un episodio isquémico provocan daño tisular. Se admite, no obstante, que la pérdida de la capacidad de las células de gestionar su propio mantenimiento desempeña una función central. La mayor parte de la energía que las células consumen procede de moléculas de trifosfato de adenosina (ATP), sintetizadas en las mitocondrias a través de un proceso de fosforilación oxidativa, dependiente de oxígeno. Cuando los niveles de oxígeno caen, la fosforilación oxidativa se demora y los niveles de ATP disminuyen. Dado que la célula agota las moléculas de ATP apenas transcurridos unos segundos desde su síntesis, se cree que el daño isquémico se produce cuando las células se quedan sin combustible, sin oxígeno.

La lesión puede agravarse cuando algunos procesos celulares con menor requerimiento energético —aunque también esenciales— siguen adelante, provocándose una descoordinación del sistema celular. Incluso la propia fosforilación oxidativa puede dañar a la célula. Cuando los niveles de oxígeno caen por debajo de una concentración óptima, la fosforilación oxidativa pierde eficiencia y libera energía prematuramente en forma de radicales libres: subproductos altamente reactivos que atacan al ADN y a otras estructuras celulares, acelerando con ello el envejecimiento. En condiciones de isquemia, estas moléculas debilitan todavía más la

ESPERANDO EL TRASPLANTE

Los órganos se tornan vulnerables al daño isquémico en cuanto se desconectan del suministro de sangre del donante. Aun cuando se les inyecte una solución de preservación fría y se les proporcione refrigeración durante el transporte, dejan de funcionar si pasa demasiado tiempo antes del trasplante. Esta ventana de viabilidad se conoce como "tiempo de isquemia fría médicamente aceptable". Sólo en EE.UU., 3216 órganos explantados quedaron sin usarse el año pasado, varios cientos de ellos porque no pudieron ser asignados o transportados a tiempo a receptores adecuados.



capacidad de la célula para desarrollar funciones cruciales.

El objetivo, por tanto, de la reanimación cardiopulmonar (CPR) y otros métodos habituales para prevenir el daño isquémico en pacientes gravemente heridos consiste en restablecer el flujo sanguíneo —y de este modo el suministro de oxígeno— a los tejidos con la mayor prontitud posible. Dada la estricta demanda de oxígeno de nuestras células, podría parecer la única estrategia viable. No obstante, en determinados animales en estado de muerte aparente, una actividad celular amortiguada aumenta de forma notable la resistencia a la isquemia en condiciones anóxicas. Ante esa observación, se nos ocurrió que la inducción del mismo tipo de estado en humanos quizá les evitaría el daño isquémico durante períodos de baja oxigenación. Había que conocer bien el mecanismo que los organismos utilizan para ponerse en "modo de espera" en respuesta a la falta de oxígeno. En ello nos empeñamos.

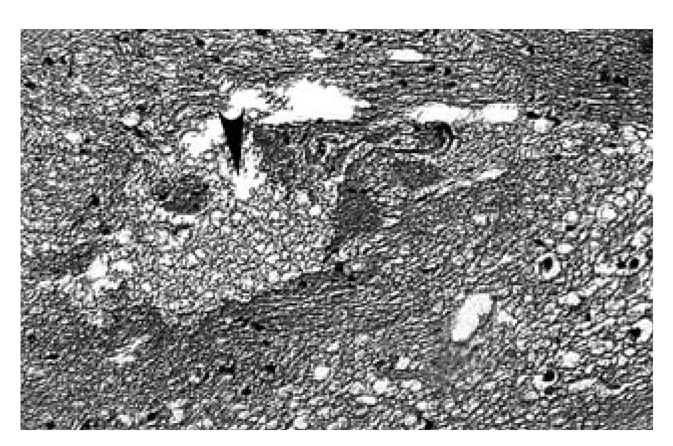
Las lecciones de un gusano

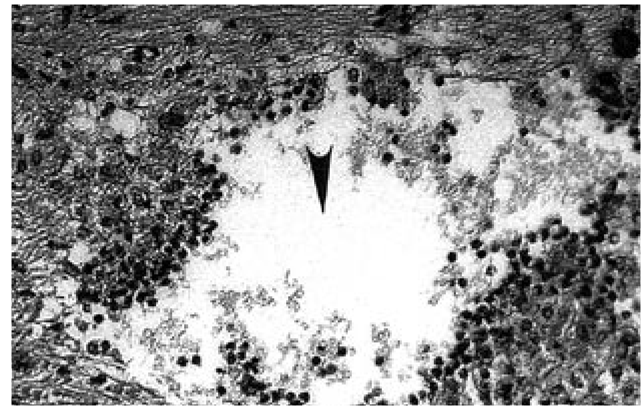
Hemos estudiado la muerte aparente en levaduras, embriones de pez cebra y el nemátodo *Caenorhabditis elegans*. Este último se halla facultado para entrar en estado de muerte aparente en cualquier estadio de su vida. Lo hace cuando se le coloca en un ambiente anóxico —una atmósfera con un contenido extremadamente bajo de oxígeno, de alrededor del 0,01 por ciento o menor— y se mantiene así durante 24 horas o más.

Pero cuando el flujo de sangre a los tejidos humanos se corta, ya sea por hemorragia o por bloqueo vascular, la concentración de oxígeno no cae hasta niveles anóxicos: en la sangre que queda y en el propio tejido hay suficiente oxígeno residual para mantener una cierta fosforilación oxidativa. Pero la producción de ATP en esas condiciones, ínfima, resulta insuficiente para soportar un ritmo normal de actividad celular, aumenta, pues, la producción de radicales libres.

Para mimetizar esas condiciones que resultan isquémicas para los humanos, se exponen embriones de *C. elegans* a concentraciones hipóxicas de oxígeno: entre 0,01 y 0,1 por ciento de O_2, muy por debajo, pues, del 21 por ciento de oxígeno del aire

1. TEJIDO CEREBRAL de ardillas terrestres árticas, donde se observa el efecto protector de la muerte aparente natural. Se insertaron unas finas sondas (0,5 milímetros) en el cerebro de ardillas que estaban hibernando y de otras fuera de hibernación. Tres días después, las ardillas fueron sacrificadas para examinar las heridas. En el tejido de los animales hibernantes (*izquierda*), se observó sólo un pequeño agujero producido por la sonda; ningún otro daño o signo de inflamación. En el de los animales que no estaban hibernando (*derecha*), se produjo una mortalidad celular alrededor de la herida original, que dejó un hueco rodeado de células inmunitarias teñidas de oscuro.





FUENTE: DPTO. DE INVESTIGACION DE LA RED UNIDA PARA LA DISTRIBUCION DE ORGANOS; *ORGAN PROCUREMENT AND TRANSPLANTATION*, INSTITUTO DE MEDICINA, 1999 (*recuadro de datos*); CARY WOLINSKY (*fotografía, arriba*); REIMPRESO DE *AMERICAN JOURNAL OF PATHOLOGY*, VOL. 158, N.º 6, PAGS. 2145-2151, JUNIO DE 2001, CON PERMISO DE THE AMERICAN SOCIETY FOR INVESTIGATIVE PATHOLOGY (*abajo*)

(normoxia), aunque algo por encima de la anoxia. En condiciones de hipoxia, los embriones no entran en muerte aparente, como sí lo harían en anoxia; la embriogénesis prosigue y ello comporta que la degradación sufrida termine en muerte celular a las 24 horas.

Si se incrementa ligeramente la concentración de oxígeno en el ambiente (hasta un 0,5 por ciento), la embriogénesis sigue un curso normal, lo mismo que en condiciones de normoxia. Así, los nemátodos sobreviven en condiciones de anoxia (mediante la entrada en un estado de muerte aparente) y en un ambiente con niveles de oxígeno de sólo el 0,5 por ciento, pero no en atmósferas con concentraciones de oxígeno intermedias. La hipoxia, pues, resulta letal.

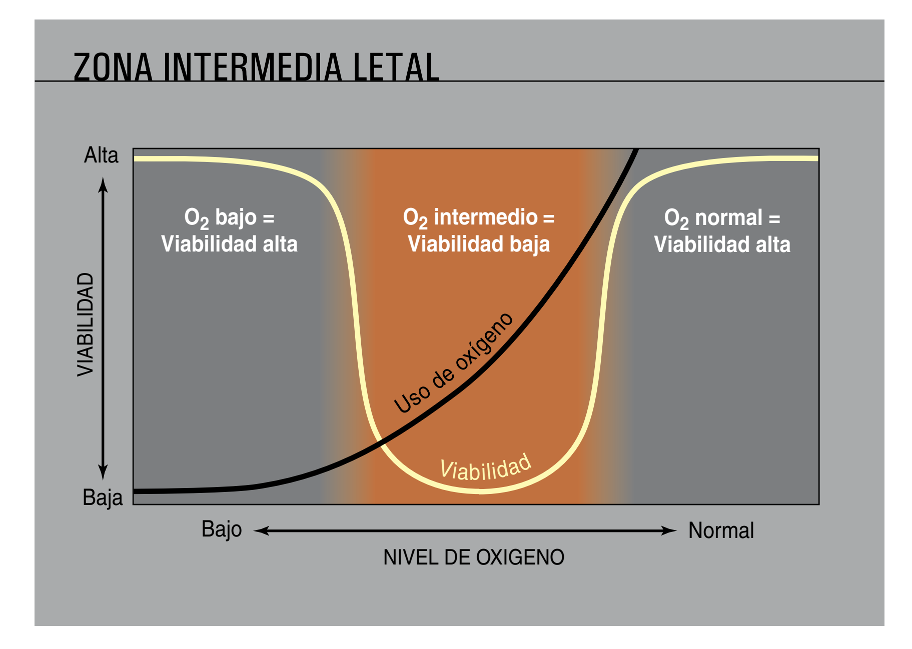
El cambio del embrión de *C. elegans* al estado de muerte aparente bajo condiciones anóxicas no obedece tanto a la inexorabilidad de la falta de oxígeno cuanto a un mecanismo predeterminado. En nuestro laboratorio identificamos dos genes que operan durante la anoxia, aunque no durante la hipoxia; desempeñan una función esencial en la detención del ciclo celular de los embriones. En condiciones anóxicas, los embriones que carecen de estos genes no pueden suspender su división celular, experimentan una separación incorrecta de sus cromosomas y muchos mueren.

Estos resultados sugieren que el daño isquémico podría evitarse no sólo incrementando la cantidad de oxígeno disponible para las células —proceso habitual—, sino también *disminuyendo* esta cantidad. Se trata de una idea que se halla en las antípodas de la praxis médica; presenta, sin embargo, importantes posibilidades para la conservación de tejidos humanos: mantener oxigenado un órgano que espera ser trasplantado o suministrar oxígeno a los tejidos resentidos en un accidente entraña notables dificultades; reducir la aportación de oxígeno, en cambio, sería mucho más fácil.

Podemos amortiguar la disponibilidad de oxígeno mediante la adición de un mimético, una molécula que guarda semejanza con el oxígeno y, por ello, se une a los mismos sitios celulares. El comportamiento químico del mimético, sin embargo, difiere del comportamiento del oxígeno. Sea, por ejemplo, el monóxido de carbono. Compite éste con el oxígeno por la unión a la citocromo *c* oxidasa, enzima que interviene en la fosforilación oxidativa. En condiciones normales, esa proteína se uniría al oxígeno, mas a diferencia de éste el monóxido de carbono no sirve para producir ATP.

¿Podríamos, mediante la adición de monóxido de carbono a una atmósfera hipóxica proteger del daño isquémico a los embriones de *C. elegans* expuestos a concentración de oxígeno intermedia? El bloqueo del escaso oxígeno remanente disponible para el embrión simularía un ambiente anóxico. Bajo tales condiciones, los embriones entraron en un estado de muerte aparente y se libraron de los efectos letales de la isquemia.

Tan alentadores resultados nos animaron, allá por 2003, a extender nuestros ensayos. Ciertos estudios previos en animales de mayor tamaño así como casos de víctimas humanas de accidentes que habían sobrevivido a condiciones de baja oxigenación sugerían que el mecanismo que rescataba a nuestros gusanos podría operar también en organismos de mayor complejidad.



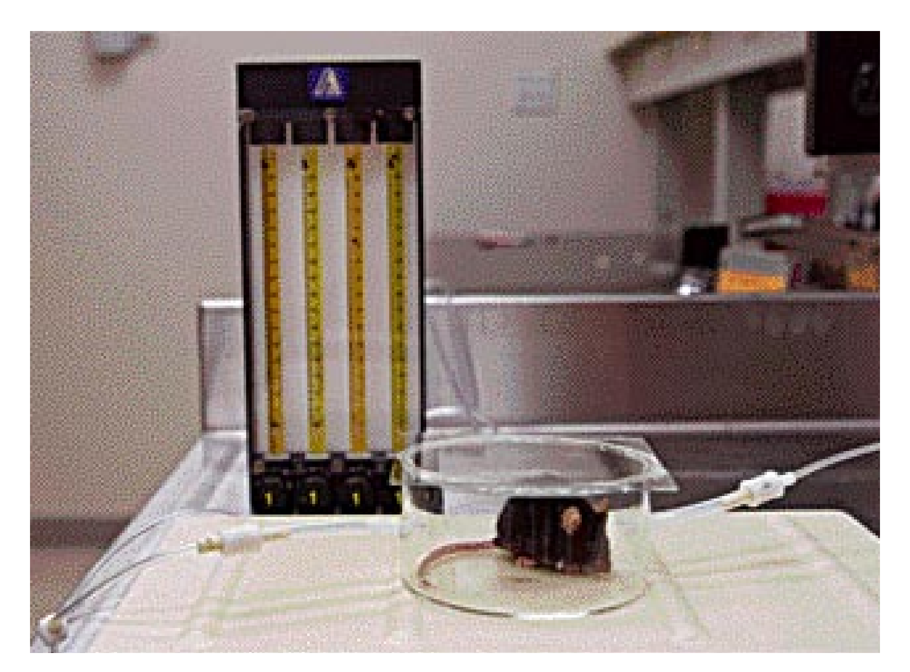
2. UN NIVEL DE OXIGENO NORMAL (normoxia) promueve una producción de energía y función celular eficientes en la mayoría de los organismos. Un nivel extremadamente bajo (anoxia) hace que las células entren en un estado de muerte aparente protector, en que cesan la producción y el consumo de energía. En condiciones intermedias (hipoxia), en cambio, las células tratan de seguir funcionando con normalidad, aunque el suministro inadecuado de oxígeno haga que su actividad sea ineficiente y potencialmente autodestructiva. Por tanto, los tejidos faltos de oxígeno pueden ser rescatados mediante la restauración de un nivel normal de oxígeno; quizá también, mediante el bloqueo de la disponibilidad del mismo.

JEN CHRISTIANSEN

Ensayos con mamíferos

Varias investigaciones con animales respaldan la idea de que, incluso en mamíferos de mayor tamaño, un descenso en los niveles de oxígeno disponible previene la lesión tisular. Cuando los animales hibernan, el estado de letargo parece protegerlos de cualquier daño. En experimentos llevados a cabo por el grupo de Kelly L. Drew, del Instituto de Biología Artica de la Universidad de Alaska en Fairbanks, se observó que si se perforaba con una sonda microscópica el cerebro de ardillas terrestres árticas en hibernación apenas si se resentía el tejido cerebral; en cambio, el mismo daño infligido a ardillas fuera de hibernación degradaba el tejido de inmediato.

Ante tales resultados, varios expertos se aprestaron a inducir un estado semejante a la hibernación en



3. CAMARA HERMETICA DE CRISTAL usada por Roth y su grupo para administrar, durante seis horas y de forma individual, dosis no letales de sulfuro de hidrógeno (H_2S) a ratones de laboratorio. En los experimentos, el grado y velocidad de la reducción de la temperatura corporal de los animales y el ritmo metabólico guardaron correlación con la concentración de H_2S en la cámara. Se demostraba así que el H_2S inducía estados de seudohibernación en mamíferos no hibernantes.

ANNIE MARIE MUSSELMAN

animales no hibernantes. Se proponían comprobar si la desaceleración celular podía inducirse de forma segura y si protegería a los tejidos el tiempo suficiente para reparar una lesión. Peter Safar y su equipo, de la Universidad de Pittsburgh, trabajaron unos veinte años con perros para perfeccionar un método de inducción de muerte aparente. En 2004, el grupo de Safar dio a conocer sus ensayos recientes. Provocaron una parada cardíaca en 14 perros; luego drenaron la sangre del cuerpo, al tiempo que la sustituían por una solución salina fría, que redujo de forma drástica la oxigenación de los tejidos: la solución salina transporta menos oxígeno que la sangre. Los perros dejaron de responder a los estímulos; no respiraban y su corazón no latía.

Se separaron entonces los perros en dos grupos. El grupo control estaba constituido por seis individuos. El grupo de ensayo constaba de ocho. A éstos se les sometió a una extirpación quirúrgica del bazo, un órgano no vital. Tras permanecer 60 minutos en estado de letargo, se revivió a todos los perros mediante reinfusión de sangre. Al cabo de setenta y dos horas, todos los perros estaban aún vivos y ninguno del grupo control mostraba secuelas funcionales o neurológicas debidas al tiempo pasado en estado de muerte aparente. Cuatro de los ocho perros sometidos a cirugía se encontraban también en condiciones normales, mientras que los cuatro restantes mostraban algunos trastornos neurológicos.

El equipo dirigido por Peter Rhee, de la Universidad de Ciencias de la Salud de las Fuerzas Armadas, emplearon una técnica similar para inducir un estado de muerte aparente en 15 cerdos adultos de raza Yorkshire. Practicaron luego cirugía vascular reparadora en algunos de ellos. Ni la memoria ni las capacidades de aprendizaje de los animales intervenidos se resintieron tras el experimento.

Puesto que la fisiología de los perros y los cerdos es muy similar a la de los humanos, esa línea de investigación ha despertado cierto entusiasmo con la esperanza de que su refinamiento permita pronto pasar al ensayo en personas que hayan sufrido un accidente grave.

Con todo, por muy prometedor que se nos ofrezca el método, conviene

saber que la exanguinación constituye una medida drástica, acompañada de complicaciones potenciales. Ello nos ha impulsado a buscar formas menos invasivas de privar temporalmente de oxígeno a las células. En tejidos humanos sin sangre —un órgano explantado de un donante, por ejemplo—, la muerte aparente podría inducirse colocando el órgano en un contenedor hermético y perfundiendo el tejido con monóxido de carbono, como hicimos con los embriones de *C. elegans*. Cuando todo estuviese a punto para el trasplante, sólo sería necesario infundir sangre en el órgano para restaurar el suministro de oxígeno. En nuestro laboratorio, hemos experimentado con esta técnica para prevenir el deterioro celular normal en muestras de tejido humano. Creemos que este enfoque prolongaría la viabilidad de los órganos que, extraídos del donante, esperan ser trasplantados.

La reversión de los efectos del monóxido de carbono resultaría fácil en órganos explantados; no así en organismos vivos con sangre circulante. Puesto que las moléculas de monóxido de carbono se unen tenazmente a los glóbulos rojos en los sitios donde, en condiciones normales, se une el oxígeno, sería inviable emplear CO en pacientes heridos. Por ello hemos experimentado también con otras moléculas miméticas del oxígeno.

En su mayoría, las sustancias que hemos ensayado se consideran tóxicas para humanos; lo mismo que el monóxido de carbono, bloquean la capacidad de las células de usar oxígeno. Las bolsas gaseosas de sulfuro de hidrógeno (H_2S), por ejemplo, constituyen un riesgo letal para los trabajadores de alcantarillados, de refinerías de petróleo (expuestos a emanaciones de "gas ácido") y de otras industrias. Por esa razón, las dosis letales de H_2S que fijan las normativas de seguridad laboral se han determinado mediante estudios realizados con roedores. Dichos trabajos nos proporcionaron un útil punto de partida cuando empezamos a ensayar el efecto de H_2S en ratones de laboratorio.

En una cámara sellada, los expusimos a atmósferas que contenían una elevada concentración de H_2S: 80 partes por millón. En los primeros cinco minutos, se observó una caída de tres veces en su producción de dióxido de carbono. Su temperatura corporal comenzó a descender. Los animales quedaron inmóviles, sin responder a los estímulos. Tras varias horas en ese entorno, el ritmo metabólico (medido a partir de la

LA VIDA EN EQUILIBRIO

Las primeras formas de vida unicelulares en la Tierra aparecieron hace unos cuatro mil millones de años. La atmósfera era entonces anóxica, probablemente densa en sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otras moléculas que contenían azufre. Estos organismos primordiales obtenían energía a partir del H_2S, de un modo similar al seguido con el oxígeno por las especies actuales. De hecho, muchos de los componentes de la maquinaria de fosforilación oxidativa parecen haber evolucionado a partir de estos mecanismos respiratorios tempranos basados en el azufre. La citocromo *c* oxidasa, por ejemplo, el componente que en condiciones normales se une al oxígeno, guarda una estrecha semejanza con el componente análogo en la respiración basada en el azufre; se une también al sulfuro de hidrógeno.

Es posible, sin embargo, que el metabolismo del oxígeno y el del azufre tengan en común algo más que una simple relación ancestral. Incluso en la actualidad, el H_2S se produce de forma natural en nuestro cuerpo, lo que podría parecer incongruente, ya que la unión del H_2S a la citocromo *c* oxidasa inhibe la capacidad del oxígeno para hacer lo propio. Quizá conforme los organismos primitivos comenzaran a adaptarse a la respiración aerobia, el sulfuro de hidrógeno adquirió una nueva función como antagonista esencial del oxígeno.

Ambas moléculas son altamente reactivas entre sí. La transferencia de electrones resulta fundamental para la vida en general: algunos átomos ceden sus electrones (se "oxidan"), mientras que otros los toman (se "reducen"). Estos procesos de reducción-oxidación, o "redox", subyacen a la producción de energía en todos los sistemas biológicos; muchos organismos buscan un ambiente en el que el potencial para las reacciones redox sea máximo.

En aguas oceánicas tranquilas, donde los gases disueltos se mezclan sobre todo por difusión, el oxígeno producido por los organismos fotosintéticos que medran cerca de la superficie penetra en las capas profundas durante el día y torna durante la noche; el H_2S, en cambio, al tratarse de un producto final del metabolismo de organismos que se alimentan del material en descomposición del fondo del mar, difunde de forma constante de abajo arriba. La reacción entre esos dos gases crea un vértice químicamente inestable donde los electrones se intercambian a un ritmo alarmante. Este gradiente determina la localización de la bacteria filamentosa móvil *Beggiatoa alba*, así como de numerosos eucariotas unicelulares y otros muchos organismos. Su acumulación puede llegar a ser tan alta, que formen marañas densas, que suben y bajan en profundidad en función del ciclo diario de oxígeno/H_2S.

Tal vez nuestro cuerpo y el de otros organismos aerobios operen como marañas de microorganismos en busca del equilibrio redox. Sin embargo, dado que no vivimos cerca de una fuente de H_2S, fabricamos el nuestro propio, proporcionando a nuestras células el ambiente óptimo químicamente inestable a partir del cual hemos evolucionado. En mi opinión, la capacidad del sulfuro de hidrógeno de unirse a la citocromo *c* oxidasa puede haber sido la causa de que haya pasado a formar parte de un programa celular intrínseco para ralentizar o detener (de forma natural) la fosforilación oxidativa en presencia del oxígeno. Este mecanismo protector sería de gran utilidad cuando las células corriesen el riesgo de autolesionarse: por ejemplo, cuando se esforzaran en producir y usar energía bajo condiciones anóxicas o, en el caso opuesto, cuando una sobredosis de oxígeno provocara que los generadores celulares trabajasen en exceso y potencialmente "frieran" a las células. Si el H_2S fuese el supuesto responsable de iniciar la parada biológica protectora, ello explicaría su eficacia en la inducción de estados de seudohibernación.

EN LA CUEVA DE LECHUGUILLA (*fotografía*), en Nuevo México, en los cráteres volcánicos de las profundidades marinas y en otros muchos enclaves, prosperan todavía bacterias que oxidan el azufre. Así debieron ser las formas de vida primitivas de la Tierra.

producción de dióxido de carbono) seguía cayendo, con un descenso final de 10 veces. La respiración se ralentizó desde un valor normal de 120 respiraciones por minuto a menos de 10.

La temperatura corporal de los animales siguió descendiendo desde los 37 grados centígrados normales hasta unos dos grados por encima de la temperatura del aire, cualquiera que ésta fuese. Conseguimos llevarla hasta un nivel de sólo 15 ºC, simplemente enfriando la cámara. En animales hibernantes, esta tendencia a subir o bajar la temperatura corporal, al tiempo que lo hace la temperatura ambiente, constituye un fenómeno habitual.

En efecto, el tratamiento con H_2S convirtió a nuestros ratones de sangre caliente en animales de sangre fría, cambio que caracteriza a la hibernación. Los mantuvimos en estas condiciones durante seis horas. Después de que revivieran, les sometimos a una serie de pruebas para comprobar si ese período de muerte aparente les había dejado secuelas funcionales o de comportamiento. Todos los ratones parecían perfectamente normales.

NORMAN THOMPSON



De los ratones a los humanos

En la actualidad, continuamos con esta línea de investigación en animales de mayor tamaño. Seguimos pensando que el sulfuro de hidrógeno puede constituir la clave para inducir estados de muerte aparente en organismos no hibernantes, hombre incluido. Aunque se considere tóxico, el H_2S se produce de forma natural también en el interior de nuestro propio cuerpo. Podría desempeñar una función, que ignoramos en la regulación de la producción celular de energía en organismos aerobios (que respiran oxígeno); no se olvide que se encargaba de la función metabólica del oxígeno molecular cuando nuestro planeta era joven y escaseaba el oxígeno. Con todo, deberán responderse muchas otras cuestiones antes de que pueda abordarse en el hombre la muerte aparente inducida por H_2S.

¿Nos hallamos capacitados los humanos para entrar en un estado de muerte aparente? He ahí el nudo de la cuestión. Se han dado casos de individuos que han llegado a soportar horas sin oxígeno. Hace unos años, cierta mujer noruega que practicaba esquí fuera de pista fue rescatada tras sufrir un accidente que la dejó bajo agua helada durante más de una hora. El equipo de emergencia la encontró clínicamente muerta: no respiraba, su corazón no latía y presentaba una temperatura corporal de 14 ºC. A pesar de que necesitó nueve horas de reanimación, su recuperación fue "excelente", según los médicos.

Beat H. Walpoh, de la Universidad de Berna, analizó otros 32 casos de hipotermia grave en los que la temperatura corporal de las víctimas —muchas de las cuales no presentaban signos vitales en el momento de ser rescatadas— oscilaba desde los 17 a los 25 ºC. Observó que casi la mitad (15 pacientes) se recuperaron del trauma sin presentar secuelas a largo plazo.

El nivel de oxígeno en los tejidos de esas personas debía ser, dada la ausencia de respiración, muy bajo. En ocasiones, el cuerpo humano posee, pues, la flexibilidad para ralentizar o suspender la actividad celular de forma reversible en respuesta a un estrés. Pero, ¿en qué ocasiones? ¿Qué factores permiten a unos vivir bajo estas condiciones, mientras que otros mueren? Ahondar en las relaciones entre la muerte aparente (natural e inducida) en los animales y la supervivencia —en gran medida inexplicable— de algunas personas quizá revele que la capacidad de entrar en un estado protector de muerte aparente reside ya en todos nosotros.

Los autores

Mark B. Roth y **Todd Nystul** empezaron a colaborar en el estudio de los mecanismos celulares y los efectos protectores de la muerte aparente cuando Nystul realizaba su doctorado en el laboratorio de Roth, en el Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas. Roth se ha venido ocupando de procesos básicos de regulación celular. Nystul investiga ahora la regulación de las células madre en *Drosophila*.

Bibliografía complementaria

ECOLOGY AND EVOLUTION IN ANOXIC WORLDS. Tom Fenchel y Bland J. Finlay. Oxford University Press, 1995.

OXYGEN: THE MOLECULE THAT MADE THE WORLD. Nick Lane. Oxford University Press, 2004.

CARBON MONOXIDE–INDUCED SUSPENDED ANIMATION PROTECTS AGAINST HYPOXIC DAMAGE IN *CAENORHABDITIS ELEGANS*. Todd G. Nystul y Mark B. Roth en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 101, n.º 24, págs. 9133–9136; 15 de junio, 2004.

HYDROGEN SULFIDE INDUCES A SUSPENDED ANIMATION–LIKE STATE IN MICE. Eric Blackstone, Mike Morrison y Mark B. Roth en *Science*, vol. 308, págs. 518; 22 de abril, 2005.



1. EL MUNDO SERIA IRRECONOCIBLE si las constantes de la naturaleza tuvieran valores diferentes. La “constante de estructura fina” (α) vale 1/137, más o menos. Si fuera otro su valor, la materia y la energía interaccionarían de maneras extrañas; desaparecería la misma distinción entre materia y energía.

Variación de las constantes

¿Cambian con el tiempo los números de los que depende el funcionamiento de la naturaleza?

John D. Barrow y John K. Webb

Se supone que la velocidad de la luz, *c*, la constante newtoniana de la gravitación, *G*, y la masa del electrón, m_e mantienen su valor en todos los lugares y en todas las épocas del universo. Por eso se llama a esas magnitudes "constantes de la naturaleza". Forman el esqueleto alrededor del cual se erigen las teorías de la física; definen el sustrato de nuestro universo. La física ha medido con precisión creciente sus valores.

Pero debe tenerse en cuenta que ni una de las constantes se ha predicho ni explicado. No se sabe en absoluto por qué toman sus valores numéricos concretos. Si se adopta el sistema internacional de unidades, *c* es 299.792.458; *G*, $6{,}673 \times 10^{-11}$; y m_e, $9{,}10938188 \times 10^{-31}$. Estos números no siguen ningún patrón perceptible. Sólo tienen algo en común: basta que fueran un poco diferentes y no habrían estructuras complejas hechas de átomos; no existiríamos. El deseo de explicar las constantes ha impedido el desarrollo de una descripción completa y unificada de la naturaleza, o "teoría de todo". Se esperaba que esa teoría demostrase que cada una de las constantes de la naturaleza sólo puede tener un valor compatible con los principios de la lógica, que revelase un orden bajo una naturaleza que parece arbitraria.

En los últimos años, sin embargo, no sólo no se ha aclarado la naturaleza de las constantes, sino que ha crecido aún más la confusión. La teoría que parece acercarse en estos momentos a una "teoría de todo", la variante de la teoría de cuerdas llamada "teoría M", sólo es autocoherente si el universo tiene más de cuatro dimensiones de espacio y de tiempo: siete dimensiones más. De ahí se sigue que las constantes que observamos no pueden ser las verdaderamente fundamentales. Estas corresponderían al espacio completo de más dimensiones. Sólo estaríamos viendo sus "sombras" tridimensionales.

Mientras, se ha comprendido que los valores de muchas de las constantes quizá se deban al mero azar, a que los adquiriesen en sucesos y procesos de partículas elementales aleatorios durante los primeros momentos del universo. La teoría de cuerdas permite un número enorme —10^{500}— de "mundos posibles" con diversos conjuntos coherentes de leyes y de constantes [*véase* "El paisaje de la teoría de cuerdas", por Raphael Bousso y Joseph Polchinski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2004]. Hasta ahora, se desconoce por qué se seleccionó nuestra combinación. Aunque puede que se siga investigando hasta reducir el número de mundos lógicamente posibles a uno, hemos de mantenernos abiertos a la turbadora posibilidad de que el universo que conocemos no sea sino uno de entre muchos —una parte de un multiverso—, cada uno de los cuales presentaría diversas soluciones de la teoría. Nuestras leyes de la naturaleza consistirían sólo en un conjunto de leyes locales, como tantos otros [*véase* "Los universos paralelos", por Max Tegmark; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2003].

En tal caso, la única explicación de muchas de nuestras constantes numéricas estribaría en que constituyeran una rara combinación que permitiera que la conciencia se desarrollase. Nuestro universo observable podría ser uno de muchos oasis aislados entre infinidades sin vida donde, al reinar fuerzas de la naturaleza diferentes de las nuestras, partículas como electrones, o estructuras como átomos de carbono y moléculas de ADN podrían resultar imposibles. Aunque fuera factible acceder a ese exterior yermo, no le serviría de nada al explorador: allí dejaría de existir.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

Así, la teoría de cuerdas da con la mano derecha y quita con la izquierda. Fue ideada en parte para explicar los valores, aparentemente arbitrarios, de las constantes físicas. Sus ecuaciones básicas contienen pocos parámetros arbitrarios. Sin embargo, al menos por ahora, no selecciona de manera unívoca los valores observados de las constantes.

Una regla fiable

La palabra "constante" puede no ser la adecuada. Nuestras constantes, incluso la parte de multiverso que habitamos, quizá varíen en el tiempo y en el espacio. Si las dimensiones extra del espacio cambiaran de tamaño, cambiarían con ellas las "constantes" en nuestro mundo tridimensional. Y si miramos lo bastante lejos en el espacio, en el tiempo pues, quizá veamos regiones espaciotemporales donde las "constantes" tomaron valores diferentes. Desde los años treinta, se viene pensando en que las constantes tal vez no respondan a su nombre. La teoría de cuerdas contiene elementos que abonan tal posibilidad; los observadores han encontrado ahí el incentivo que necesitaban para comprobar la idea.

Pero los experimentos necesarios para ello desaniman. El primer problema es que los cambios de las constantes podrían afectar al propio aparato de laboratorio. El tamaño de los átomos quizás esté aumentando, pero si la regla que se utiliza para medirlos también crece, nunca podremos descubrirlo. Los experimentadores suponen que sus patrones de referencia —reglas, masas, relojes— son fijos; mas han de prescindir de esa premisa cuando estudian la variabilidad de las constantes. Deben centrar su atención en las constantes que no tienen unidades —es decir, que son números puros—; valen, pues, igual en cualquier sistema de unidades. Sirva de ejemplo el cociente de dos masas, la del protón y la del electrón.

Cierto cociente de particular interés combina la velocidad de la luz, c, la carga eléctrica de un único electrón, e, la constante de Planck, h, y la constante dieléctrica (o permitividad) del vacío ε_0. Arnold Sommerfeld, pionero en la aplicación de la mecánica cuántica al electromagnetismo, introdujo en 1916 ese famoso número, la "constante de estructura fina" $\alpha = e^2/2\varepsilon_0 hc$. Alfa cuantifica las propiedades relativistas (c) y cuánticas (h) de las interacciones electromagnéticas (e) donde intervengan partículas cargadas en el espacio vacío (ε_0). Su medición experimental da el valor 1/137,03599976. El número 137 ha adquirido así una categoría legendaria entre los físicos.

Si α tuviera un valor distinto, todo tipo de características vitales del mundo que nos rodea cambiarían. Si el valor fuera más bajo, la densidad de la materia atómica sólida disminuiría (proporcionalmente a α^3), los enlaces moleculares se romperían a temperaturas más bajas (α^2) y el número de elementos estables de la tabla periódica podría aumentar ($1/\alpha$). Si α fuera demasiado grande, los núcleos atómicos pequeños no podrían existir, porque la repulsión eléctrica de sus protones superaría la interacción nuclear fuerte que los une. Un valor de 0,1 destruiría el carbono.

Las reacciones nucleares en el interior estelar son especialmente sensibles a α. La fusión sólo ocurrirá si la gravedad de la estrella produce temperaturas suficientes para obligar a los núcleos a juntarse, pese a su tendencia a repelerse. Si α superara 0,1, la fusión resultaría imposible (a menos que otros parámetros, como el cociente de la masa del electrón a la del protón, se ajustaran para compensar). Un cambio de apenas un 4 por ciento en α alteraría los niveles de energía de los núcleos de carbono hasta tal punto, que cesaría la producción de este elemento por las estrellas.

La proliferación nuclear

El segundo problema experimental no se soluciona con tanta facilidad: medir cambios en las constantes requiere un equipo de alta precisión que permanezca estable el tiempo suficiente para registrarlos. Ni siquiera los relojes atómicos pueden detectar derivas de la constante de estructura fina más que en días o en años, como mucho. Si α hubiese cambiado en más de cuatro partes en 10^{15} en un período de tres años, los mejores relojes lo habrían captado. No lo han hecho. Parecerá una confirmación impresionante de la inmutabilidad, pero tres años son un parpadeo cósmico. Un cambio lento aunque sustancial a lo largo de la historia del universo habría pasado inadvertido.

Por fortuna, se han encontrado otras formas de poner a prueba la invariabilidad de la constante. Durante los años setenta, unos científicos de la Comisión de Energía Atómica francesa descubrieron que la composición isotópica del mineral de una mina de uranio en Oklo, Gabón, se parecía a la de los residuos de un reactor nuclear. Hace unos dos mil millones de años, la mina fue un reactor nuclear natural.

En 1976 Alexander Shlyakhter, del Instituto de Física Nuclear de San Petersburgo, observó que la existencia de un reactor natural depende de que un determinado estado del núcleo de samario porte energía que facilita la captura de neutrones. Y esa energía es muy sensible al valor de α. Por consiguiente, si la constante de estructura fina hubiera sido un poco diferente, no habría podido producirse la reacción en cadena. Sin

Resumen/Constantes de la física

- Las ecuaciones de la física contienen numerosas magnitudes que se toman por constantes: tendrían el mismo valor en cualquier punto del espacio y en cualquier instante del tiempo.
- Durante los últimos seis años, los autores y sus colaboradores han venido planteando objeciones a tal supuesto. La comparación de observaciones de cuásares con las mediciones de referencia en el laboratorio les ha llevado a la conclusión de que los elementos químicos absorbieron la luz en el pasado lejano de manera diferente del proceso seguido ahora por esos mismos elementos. La diferencia se puede explicar por un cambio en una de las constantes físicas, la de estructura fina, de algunas partes por millón.
- Aunque puede parecer pequeño este cambio, si se confirma, resultaría revolucionario. Significaría que las constantes observadas no son universales. La causa quizá se encuentre en que el espacio tenga dimensiones extra.

LA LUZ Y LA CONSTANTE DE ESTRUCTURA FINA

Varias de las constantes de la naturaleza mejor conocidas, entre ellas la velocidad de la luz, se combinan en la constante de estructura fina (α): un número que representa la intensidad con que interaccionan las partículas mediante las fuerzas electromagnéticas. Una de tales interacciones es la absorción de fotones por átomos. Iluminado por luz, un átomo absorbe determinados colores, cada uno de los cuales corresponde a fotones de una cierta longitud de onda.

Cuando α tiene su valor actual — 280,35 nanómetros; 279,64 nm; Nivel de energía

Cuando α es un 5% menor — 280,45 nm; 279,80 nm

LOS ESPECTROS SIMULADOS muestran cómo los cambios en α afectan a la absorción de la luz del ultravioleta cercano en varias especies atómicas. Las líneas negras horizontales representan longitudes de onda absorbidas. Cada tipo de átomo o de ion tiene un patrón único de líneas. Los cambios en la constante de estructura fina afectan al magnesio (Mg), al silicio (Si) y al aluminio (Al) menos que al hierro (Fe), al zinc (Zn), al cromo (Cr) y al níquel (Ni).

LOS NIVELES DE ENERGIA de los electrones en el átomo explican el proceso de absorción. La energía de un fotón se transfiere a un electrón, que salta hacia arriba por la escalera de niveles permisibles. Cada posible salto corresponde a una longitud de onda distinta. El espaciamiento de los niveles depende de la intensidad con que el núcleo atómico atrae al electrón y, por lo tanto, de α. En el caso de los iones de magnesio (Mg^+), si α fuera menor, los niveles estarían más juntos. Los fotones necesitarían menos energía (lo que significaría una longitud de onda más larga) para hacer saltar a los electrones escalera arriba.

Cambio relativo en α (porcentaje) — Longitud de onda (nanómetros)

ALISON KENDALL; FUENTE: JOHN K. WEBB

embargo, se produjo, lo que implica que la constante no ha cambiado en más de una parte en 10^8 en los últimos dos mil millones de años. (Se sigue discutiendo acerca de los resultados cuantitativos exactos porque hay mucha incertidumbre en torno a las condiciones que rodearon al reactor natural.)

En 1962, P. James E. Peebles y Robert Dicke, de la Universidad de Princeton, aplicaron principios similares a los meteoritos. Las proporciones relativas de diversos isótopos radiactivos en estas rocas antiguas dependen de α. La restricción más sensible es la impuesta por la desintegración beta del renio en osmio. Según el trabajo reciente de los equipos de Keith Olive, de la Universidad de Minnesota, y Maxim Pospelov, de la Universidad de Victoria, en la Columbia Británica, en la época en que se formaron las rocas α difería en menos de dos partes en 10^6 de su valor actual. Este resultado, aunque menos exacto que los datos de Oklo se retrotrae más en el tiempo: hasta el origen del sistema solar, hace 4600 millones de años.

Para analizar posibles cambios durante períodos de tiempo aún más largos, hay que mirar a los cielos. La luz, que tarda miles de millones de años en alcanzar nuestros telescopios desde fuentes astronómicas remotas, lleva consigo una instantánea de las leyes y de las constantes de la física de la época en que emprendió viaje y de la materia que encontró en el camino.

Lectura de líneas

La astronomía empezó a poner de su parte en el estudio de las constantes al poco del descubrimiento de los cuásares en 1965. Se partía de una idea simple. La luz de esas fuentes brillantes situadas a distancias enormes atravesó el gas que rodeaba a las galaxias jóvenes. Ese gas absorbió la luz de cuásares a determinadas frecuencias. Se imprimió así un "código de barras", una secuencia de líneas estrechas, en el espectro del cuásar (*véase el recuadro* "El cambio de alfa en la luz de los cuásares).

Siempre que un gas absorbe luz, los electrones de los átomos saltan de un estado de energía bajo a otro más alto. Los niveles de energía están determinados por la intensidad con que el núcleo atómico atrae a los electrones, parámetro dependiente a su vez de la intensidad de la fuerza electromagnética y, por lo tanto, de la constante de estructura fina. Si la constante hubiera sido diferente cuando se absorbió la luz,



EL ESPECTRO DE UN CUASAR, tomado por el *Very Large Telescope* del Observatorio Europeo del Sur, muestra las líneas de absorción producidas por las nubes de gas existentes entre el cuásar (*indicada con una flecha a la derecha*) y nosotros. La posición de las líneas (*indicada con flechas más a la derecha*) señala que la luz atravesó las nubes hace cerca de 7500 millones de años.

ALISON KENDALL

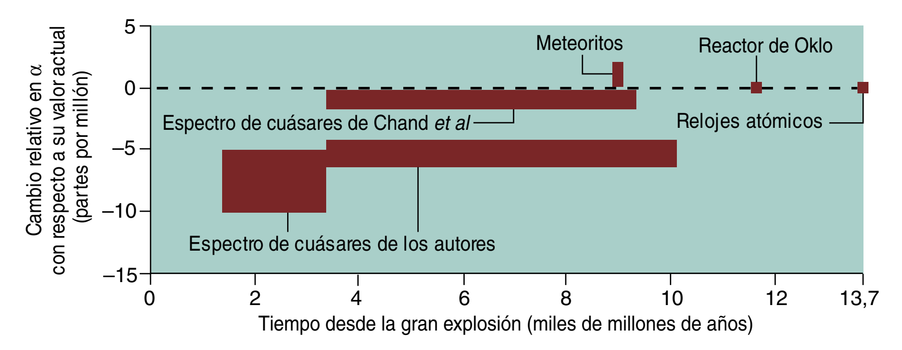
o en la región particular del universo en donde sucedió la absorción, la energía requerida para llevar el electrón de un nivel a otro diferiría de la requerida hoy en los experimentos de laboratorio; divergerían las longitudes de onda de las transiciones vistas en los espectros. El cambio de las longitudes de onda está ligado a la configuración orbital de los electrones. Para un cambio dado de α, algunas longitudes de onda se reducirían, mientras que otras aumentarían. No es fácil que los errores en la calibración de los datos produzcan ese mismo complejo patrón de efectos; la finura con que se contrasta la variabilidad de alfa por esta vía resulta asombrosa.

Antes de que comenzáramos nuestro trabajo hace siete años, las tentativas de realizar estas mediciones adolecían de dos tipos de limitaciones. Para empezar, no se habían medido en el laboratorio las longitudes de onda de muchas de las líneas espectrales pertinentes con la suficiente precisión. Se sabía más sobre los espectros de cuásares situados a miles de millones de años luz que de los espectros de muestras terrestres. Necesitábamos medidas de laboratorio de alta precisión con las que comparar los espectros de los cuásares. Persuadimos a los experimentadores de que las realizasen. Efectuaron las primeras mediciones Anne Thorne y Juliet Pickering, del Colegio Imperial de Londres, y vinieron a continuación las de los grupos dirigidos por Sveneric Johansson, del Observatorio de Lund y Ulf Griesmann y Rainer Kling, del Instituto Nacional de Patrones y Medidas de Maryland.

La segunda dificultad: hasta ese momento, sólo se empleaban dobletes alcalinos, pares de líneas de absorción que surgen de un mismo gas, sea carbono o silicio; se comparaba el espaciamiento que estas líneas presentaban en los espectros de los cuásares con el medido en el laboratorio. Este método, sin embargo, no aprovecha otro efecto de una α cambiante: que no sólo modifica el espaciamiento de las líneas de absorción con respecto al nivel más bajo de energía, o estado fundamental, sino también la posición del propio estado fundamental. El segundo efecto supera al primero. Al prescindir del mismo, la más alta precisión alcanzada era sólo de una parte en 10^4, aproximadamente.

En 1999, uno de nosotros (Webb) y Victor V. Flambaum, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, presentamos un método que tenía en cuenta ambos efectos. Decuplicamos

con ello la precisión. Además, el método permitía comparar diversas especies (por ejemplo, magnesio y hierro); posibilitaba así comprobaciones adicionales. Poner esta idea en práctica precisó de cálculos numéricos complicados para establecer con exactitud cómo las longitudes de onda observadas dependían de α en los diversos tipos de átomos. Este nuevo método de los "muchos multipletes", combinado con los telescopios y los detectores modernos, nos ha permitido examinar la inmutabilidad de α con una precisión hasta entonces desconocida.



2. ALGUNAS MEDICIONES de la constante de estructura fina indican que fue menor en otras épocas cósmicas. Otras, en cambio, son compatibles con que no haya cambiado nunca. La constante quizá varió en una fase de la historia cósmica y dejó de hacerlo después. (Los recuadros representan conjuntos de datos.)

Cambio de mentalidad

Cuando emprendimos este proyecto, suponíamos que el valor de la constante de estructura fina permanecía inalterado desde hacía mucho tiempo. Nuestra contribución sólo consistiría en confirmarlo con una precisión más alta. Para nuestra sorpresa, los primeros resultados, en 1999, mostraron diferencias pequeñas, pero estadísticamente significativas. Datos posteriores confirmaron este hallazgo. Basándonos en 128 líneas de absorción de cuásares, encontramos un aumento medio de α de cerca de seis partes por millón con respecto al período que va de hace 6000 a 12.000 millones de años.

Las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias. ¿Qué problemas podrían haber adulterado los datos o viciado los métodos de análisis? Las incertidumbres en los valores observados se pueden clasificar en dos tipos: sistemáticas y aleatorias. Cuesta menos entender las aleatorias; sólo son eso, aleatorias. Difieren para cada medición singular, pero el promedio tiende a cero en una muestra grande. Las incertidumbres sistemáticas, endémicas en astronomía, no tienden a promediarse y cuesta mucho más trabajar con ellas. Los experimentadores de laboratorio pueden alterar su dispositivo instrumental para reducirlas al mínimo. A los astrónomos, sin embargo, no les es posible cambiar el universo; han de aceptar que todos sus métodos de recopilar datos exhiben sesgos que no cabe eliminar. Así, en cualquier censo galáctico habrá demasiadas galaxias brillantes, porque son más fáciles de ver. Identificar y neutralizar estos sesgos constituye un desafío permanente.

Primero comprobamos que la escala de longitudes de onda con la que medíamos las líneas espectrales de los cuásares no estaba distorsionada. Una de las fases en que podría haberse generado una corrupción de esa naturaleza es el procesado de los datos de los cuásares, que convierte su cruda forma telescópica en un espectro calibrado. Aunque un simple estiramiento o compresión lineal de la escala de longitudes de onda no simularía con gran precisión un cambio de alfa, una imitación deficiente ya explicaría nuestros resultados. Analizamos los datos de calibración como si se tratara de datos genuinos de cuásares. Este procedimiento descartó con una gran fiabilidad los errores de distorsión.

Durante más de dos años analizamos un sesgo potencial tras otro; sólo los descartábamos cuando la investigación detallada indicaba que tendrían un efecto demasiado pequeño. Hasta ahora hemos identificado sólo un tipo de sesgo que pudiera ser grave. Afecta a las líneas de absorción producidas por el elemento magnesio. Cada uno de los tres isótopos estables del magnesio absorbe luz de una diferente longitud de onda, si bien las tres longitudes de onda están muy cerca una de otra; la espectroscopía de los cuásares suele considerar las tres líneas como una sola. De las mediciones de laboratorio de las proporciones relativas de los tres isótopos se deduce la contribución de cada uno. Pero hay que tener en cuenta que esas proporciones diferirían de modo apreciable de las que hubo en el joven universo en el caso, muy verosímil, de que las estrellas que dispersaron el magnesio por sus respectivas galaxias hubiesen sido, de media, más pesadas que las estrellas análogas de hoy. Y tal diferencia simularía un cambio en α.

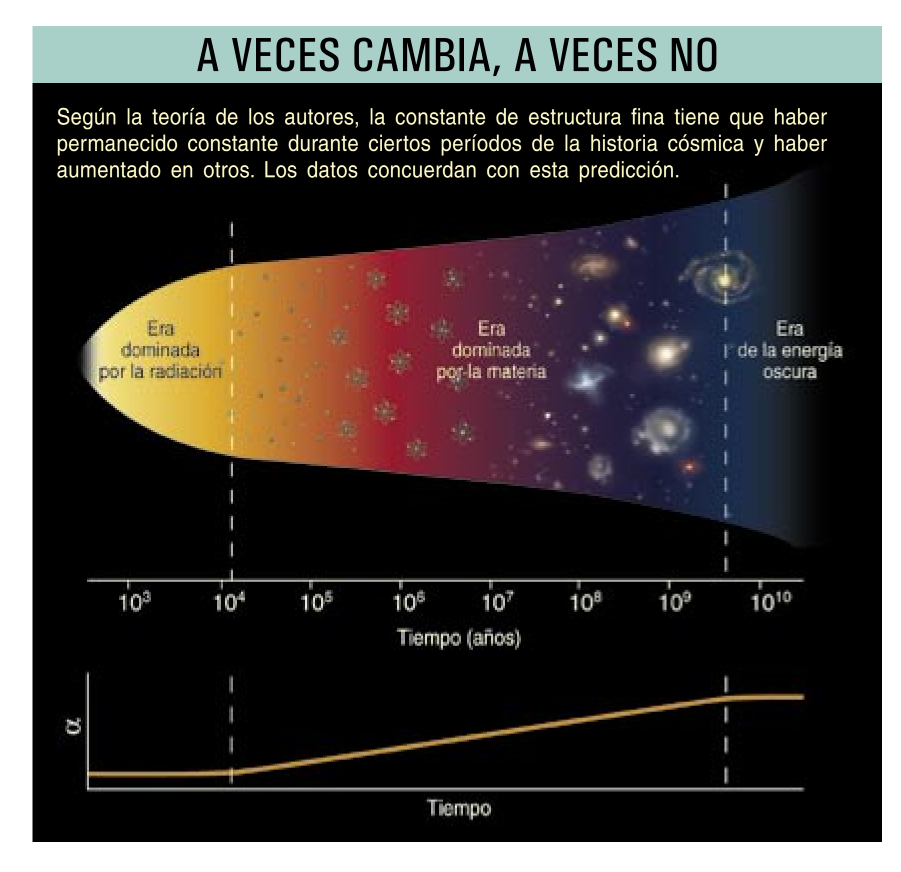
Un estudio reciente aclara que no resulta tan fácil atribuir nuestro resultado a ese efecto. Según Yeshe Fenner y Brad K. Gibson, de la Universidad Tecnológica de Swinburne, y Michael T. Murphy, de la Universidad de Cambridge, unas proporciones isotópicas ajustadas para que emulen una variación en α llevan también a predecir un exceso de producción de nitrógeno en el universo primitivo, pero las observaciones lo niegan. Deberíamos, pues, encarar la posibilidad de que α haya estado cambiando.

En seguida se comprendió la importancia extraordinaria que tendría la confirmación de nuestros resultados. Los espectroscopistas de cuásares se pusieron a trabajar y no tardaron en obtener sus propias medidas. En 2003, los equipos dirigidos por Sergei Levshakov, del Instituto Técnico-Físico Ioffe en San Petersburgo, y Ralf Quast, de la Universidad de Hamburgo, investigaron tres nuevos sistemas de cuásares. Al año siguiente, Hum Chand y Raghunathan Srianand, del Centro Interuniversitario para la Astronomía y la Astrofísica de la India, Patrick Petitjean, del Instituto de Astrofísica de París, y Bastien Aracil, del laboratorio astrofísico LERMA, también de París, analizaron 23 más. Ninguno de estos grupos vio un cambio en α. Chand adujo que cualquier cambio ocurrido

ALISON KENDALL; FUENTE: JOHN K. WEBB

A VECES CAMBIA, A VECES NO

Según la teoría de los autores, la constante de estructura fina tiene que haber permanecido constante durante ciertos períodos de la historia cósmica y haber aumentado en otros. Los datos concuerdan con esta predicción.



desde hace 6000-12.000 millones de años, debe ser menor que una parte en 10^6.

¿Por qué un análisis bastante similar, sólo con datos distintos, produjo una discrepancia tan radical? Lo ignoramos. Los datos de estos grupos son de calidad excelente. Proceden, sin embargo, de muestras mucho más pequeñas que las nuestras y no se retrotraen tanto en el tiempo. El análisis de Chand no evalúa todos los errores experimentales y sistemáticos; además, al basarse en una versión simplificada del método de los muchos multipletes, puede haber introducido nuevos sesgos.

John Bahcall, de Princeton, ha criticado el método mismo de los muchos multipletes, si bien los problemas que ha identificado caen en la categoría de las incertidumbres aleatorias, que deben desaparecer en una muestra grande. El y sus colaboradores, así como un equipo dirigido por Jeffrey Newman, del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley, han observado líneas de emisión y no líneas de absorción. Por ahora, este método ha resultado mucho menos preciso, pero en el futuro podría ofrecer cotas útiles del posible cambio de α.

Reformar las leyes

Si nuestros resultados fuesen correctos, las consecuencias, aún no estudiadas en toda su amplitud, serían de enorme alcance. Hasta hace no mucho, los intentos de evaluar qué le sucedería al universo si cambiara la constante de estructura fina no acababan de rendir frutos. Se limitaban a variar α en las mismas fórmulas que se habían deducido suponiéndola constante. Se trataba de una práctica dudosa. Si α varía, sus efectos deben conservar la energía y el momento e influir en el campo gravitacional del universo. En 1982, Jacob D. Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, generalizó las leyes del electromagnetismo con el fin de que trataran con rigor las constantes que en puridad no eran tales. La teoría eleva α de mero número a campo escalar, es decir, a un ingrediente dinámico de la naturaleza. No incluye la gravedad, sin embargo. Hace cuatro años, uno de los autores (Barrow), Håvard Sandvik y João Magueijo, del Colegio Imperial de Londres, la ampliaron para que abarcase la gravedad.

Uno de los atractivos de la nueva versión reside en la sencillez de sus predicciones. Las variaciones en α de algunas partes por millón tendrían un efecto insignificante en la expansión del universo, ya que el electromagnetismo es mucho más débil que la gravedad a escalas cósmicas. Pero aunque los cambios en la constante de estructura fina no afectasen perceptiblemente a la expansión del universo, la expansión sí afectaría a α. Los cambios en α se deberían, según nuestra teoría, a desequilibrios entre la energía del campo eléctrico y la energía del campo magnético. Durante las primeras decenas de miles de años de la historia cósmica, la radiación dominó sobre las partículas cargadas y mantuvo en equilibrio los campos eléctricos y magnéticos. A medida que el universo se expandió, la radiación se diluyó, y la materia se convirtió en el componente dominante del cosmos. Las energías eléctrica y magnética ya no eran iguales y α fue aumentando como el logaritmo del tiempo, muy despacio. Hace unos seis mil millones de años, la energía oscura asumió el control y aceleró la expansión, lo que dificultó desde entonces que cualquier influencia física se propague a través del espacio. Así, α se convirtió de nuevo en casi constante.

Este comportamiento predicho es compatible con nuestras observaciones. Las líneas espectrales de los cuásares representan el período dominado por la materia en la historia cósmica, cuando α aumentaba. Los resultados de laboratorio y los de Oklo pertenecen al período dominado por la energía oscura, durante el cual α persistió constante. El estudio continuado del efecto del cambio de α en los elementos radiactivos de los meteoritos reviste particular interés porque analiza la transición entre ambos períodos.

Alfa es sólo el principio

Ninguna teoría digna de consideración se limita a reproducir observaciones ya hechas; debe predecir otras nuevas. La teoría que acabamos de presentar cumple esa regla: predice que la variación de la constante de estructura fina los objetos caen de forma diversa. Galileo había formulado el principio de equivalencia débil, a tenor del cual los cuerpos caen en el vacío a la misma velocidad fuera cual fuera su composición. Una célebre demostración de su validez

ALISON KENDALL

fue la del astronauta David Scott, del Apolo 15. Dejó caer una pluma y un martillo, y tocaron el suelo lunar al mismo tiempo. Pero si α varía, ese principio ya no se cumple a rajatabla. Las variaciones generan una fuerza sobre las partículas cargadas. Cuantos más protones tenga un átomo en su núcleo, con mayor intensidad le afectará esta fuerza. Si nuestras observaciones de cuásares son correctas, las aceleraciones de diversos materiales diferirán en alrededor de una parte en 10^{14}, valor demasiado pequeño para que pueda captarse en el laboratorio (tendría que ser casi cien veces mayor). En cambio, algunas futuras misiones espaciales, entre ellas STEP (acrónimo de "comprobación del principio de equivalencia en el espacio"), sí tendrán sensibilidad suficiente.

Y aún hay más. Los estudios de α anteriores pasaron por alto una consideración esencial: la granularidad del universo. Al igual que todas las galaxias, nuestra Vía Láctea sobrepasa en alrededor de un millón de veces la densidad del promedio cósmico; por ello, no se expande como el resto del universo. En 2003, Barrow y David F. Mota, de Cambridge, calcularon que α podría comportarse dentro de la galaxia de manera distinta que en las regiones más vacías del espacio. Cuando una galaxia joven se condensa y alcanza el equilibrio gravitatorio, α apenas si cambia en su interior, pero seguirá haciéndolo fuera. En tal caso, los experimentos terrestres que analizan la invariabilidad de α sufrirían un sesgo de selección. Debemos estudiar más este efecto para saber cómo afectaría a las comprobaciones del principio de equivalencia débil. Aún no se han visto variaciones espaciales de α. Basándose en la uniformidad de la radiación cósmica del fondo de microondas, Barrow demostró recientemente que α no varía en más de una parte en 10^8 entre regiones del firmamento separadas 10 grados entre sí.

Todo este trasiego de ideas, ¿en qué lugar deja la cuestión de α? Aguardamos nuevos datos y nuevos análisis para confirmar o refutar que α varía al nivel indicado. Los investigadores se centran en α, y no en otras constantes de la naturaleza, porque los efectos de su cambio se ven más fácilmente. Si α cambia, sin embargo, otras constantes podrían variar también: los entresijos de la naturaleza serían más volubles de lo que nos imaginábamos.

Las constantes siguen fascinándonos. No hay ecuación de la física que no las contenga; parecen tan prosaicas, que la gente tiende a olvidar cuán inexplicables son sus valores. Su origen guarda relación con algunas de las cuestiones fundamentales de la ciencia moderna, desde la unificación de la física a la expansión del universo. Quizá no consistan sino en la sombra superficial de una estructura mayor y más compleja que el universo tridimensional que vemos. Determinar si las constantes de verdad merecen ese nombre significa sólo el primer paso en el camino que conduce a una apreciación más profunda de la naturaleza de las cosas.



3. NUESTRO UNIVERSO OBSERVABLE, según se cree, es una pequeña parte de un universo inmerso en un multiverso. En otras partes la constante de estructura fina podría tener un valor diferente. Si un astronauta pudiera aventurarse en esos reinos, se encontraría con una escena surrealista: se quedaría sin las leyes de la física que permiten su existencia.

RICHARD SWORD

Los autores

John D. Barrow y **John K. Webb** analizan juntos las constantes de la naturaleza desde 1996, cuando Webb pasó un año sabático con Barrow en la Universidad de Sussex. Barrow había investigado nuevas posibilidades teóricas de modificar las constantes y Webb andaba inmerso en observaciones de cuásares. Su proyecto pronto atrajo a otros físicos y astrónomos, en especial a Victor V. Flambaum, de la Universidad de Nueva Gales de Sur, Michael T. Murphy, de la Universidad de Cambridge, y João Magueijo, del Colegio Imperial de Londres. Barrow es ahora profesor de Cambridge y miembro de la Regia Sociedad; Webb enseña en Nueva Gales de Sur.

Bibliografía complementaria

FURTHER EVIDENCE FOR COSMOLOGICAL EVOLUTION OF THE FINE STRUCTURE CONSTANT. J. K. Webb, M. T. Murphy, V. V. Flambaum, V. A. Dzuba, J. D. Barrow, C. W. Churchill, J. X. Prochaska y A. M. Wolfe en *Physical Review Letters*, vol. 87, n.º 9, trabajo n.º 091301; 27 de agosto, 2001. Disponible en arxiv.org/abs/astro-ph/0012539

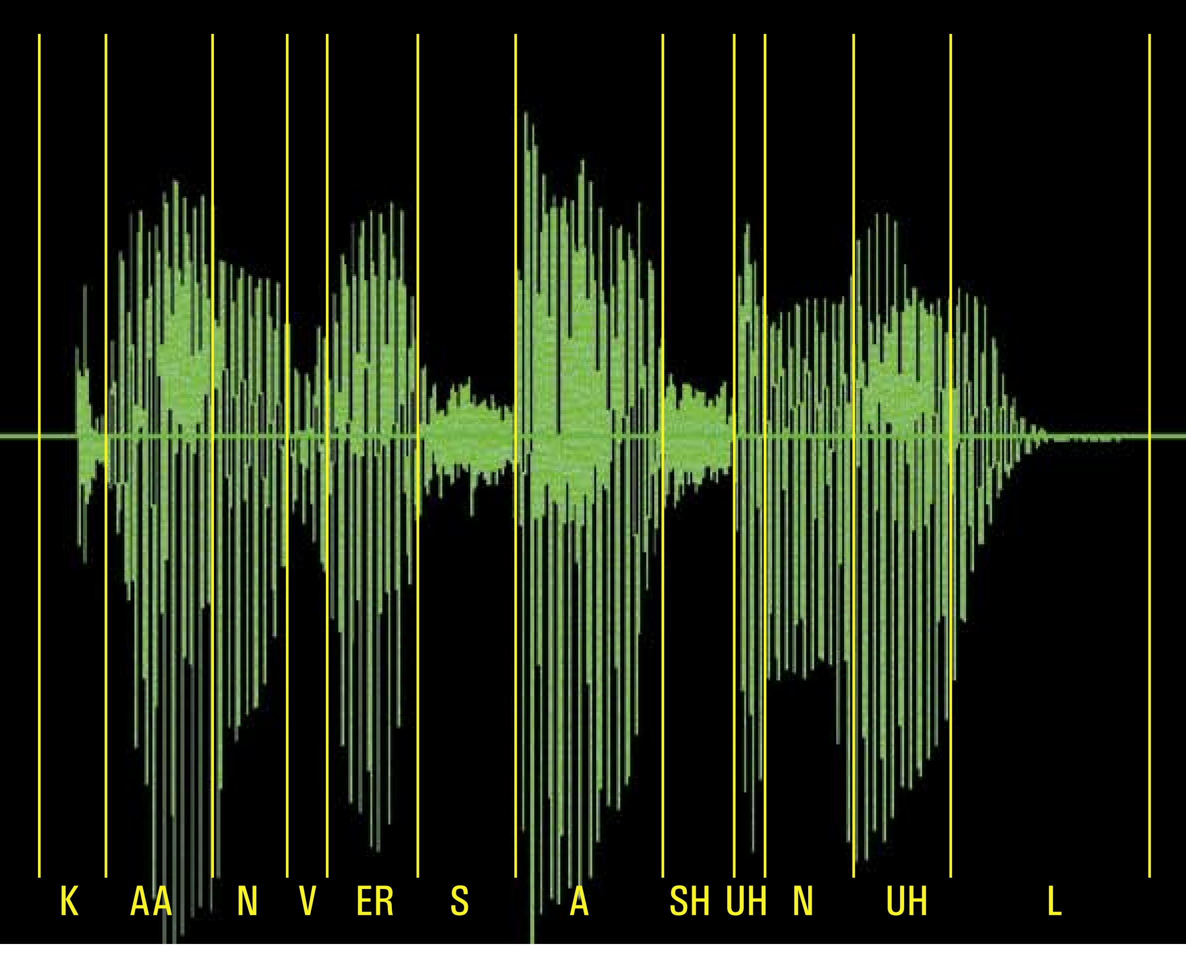
A SIMPLE COSMOLOGY WITH A VARYING FINE STRUCTURE CONSTANT. H. B. Sandvik, J. D. Barrow y J. Magueijo en *Physical Review Letters*, vol. 88, trabajo n.º 031302; 2 de enero, 2002. astro-ph/0107512

THE CONSTANTS OF NATURE: FROM ALPHA TO OMEGA. John D. Barrow. Jonathan Cape; Londres, y Pantheon; Nueva York, 2002.

ARE THE LAWS OF NATURE CHANGING WITH TIME? J. Webb en *Physics World*, vol. 16, parte 4, págs. 33-38; abril 2003.

LIMITS ON THE TIME VARIATION OF THE ELECTROMAGNETIC FINE-STRUCTURE CONSTANT IN THE LOW ENERGY LIMIT FROM ABSORPTION LINES IN THE SPECTRA OF DISTANT QUASARS. R. Srianand, H. Chand, P. Petitjean y B. Aracil en *Physical Review Letters*, vol. 92, trabajo n.º 121302; 26 de marzo, 2004. astro-ph/0402177

Conversación



Si llamamos al servicio de información de una gran empresa, probablemente nos responda un ordenador. Hasta hace muy poco, estos contestadores automáticos se limitaban a encadenar locuciones grabadas de antemano: "Usted ha llamado al ...9 ...3 ...4 ...1 ...4". Pronunciadas con un timbre metálico, estas palabras no resultan precisamente afables. Además, al manejar sólo frases enlatadas, su capacidad de comunicación quedaba muy restringida.

En el curso de los últimos diez años, la voz sintetizada por ordenador ha mejorado notablemente su inteligibilidad y audibilidad. Los expertos encaran ahora un reto mayor: acercarse al habla humana real confiriéndole capacidad de modular tono y expresión, para así mejorar la transmisión de información. Alcanzar este objetivo requiere un análisis profundo de los componentes del habla y de los sutiles efectos del volumen, el tono, el ritmo y la entonación de cada persona. Este es el propósito de nuestro grupo de investigación en IBM, así como el de otras empresas (AT&T, Nuance, Cepstral y ScanSoft) e instituciones (Universidad Carnegie Mellon, Universidad de California en Los Angeles, Instituto de Tecnología de Massachusetts e Instituto de Graduados de Oregón).

A semejanza de otros métodos precedentes que se fundaban en la fragmentación de frases, la última generación de conversores de texto en habla —en concreto la versión NAXPRES Synthesizer ("sintetizador de voz expresiva natural") de IBM— parten de la grabación de la voz humana; tienen capacidad de respuesta en tiempo real. La diferencia estriba en que los nuevos aparatos articulan con un sonido natural, cualquier palabra, incluidas las que no se expresan en el corpus de grabaciones iniciales.

Compañías e instituciones de todo el mundo gastan miles de millones de euros al año en servicios de información automatizados. Estos combinan varias técnicas: reconocimiento de voz, comprensión del lenguaje, búsqueda en bases de datos, generación de textos y, por fin, síntesis del habla. Mediante el encadenamiento de palabras, o fragmentos de palabras, que han sido pronunciadas por personas reales, se construye un habla sintética que personifica (da un rostro humano) a la máquina parlante. El llamante valora el servicio según la calidad de la voz escuchada. Una voz expresiva, cuyo tono se ajuste adecuadamente al significado de la oración (sea ésta afirmativa o negativa), resulta mucho más agradable y eficaz.

ANDY AARON Y JOHN F. PITRELLI

automática

El habla sintetizada por ordenador remeda cada vez mejor el habla humana

Andy Aaron, Ellen Eide y John F. Pitrelli



FONEMAS correspondientes al título original del artículo ("Conversational Computers").

Los consumidores no tardarán en beneficiarse de la variedad de nuevas aplicaciones que ofrece esta técnica en rápida evolución: transmisión oral de últimas noticias y partes meteorológicos —mientras tanto, sólo disponibles por escrito—, lectura en voz alta de textos para discapacitados o estudiantes de lenguas extranjeras. Sin olvidar la interacción oral entre automóvil y conductor (quien podrá referir en voz alta direcciones de conducción automatizada asociadas a varios millones de nombres de calle de todo el mundo) y recuperación de mensajes de correo electrónico por teléfono u otro sistema de información, sin necesidad de visualizarlos en pantalla.

Con el tiempo, el habla sintetizada de sonido natural prestará voz expresiva a los aparatos portátiles y a los electrodomésticos. Con el tiempo se extenderá su aplicación a la generación de habla animada para personajes de videojuegos y cine.

Máquinas parlantes

La síntesis del habla constituye, a un tiempo, el triunfo de la técnica y la última encarnación de un viejo sueño. Los primeros intentos de simulación de la voz humana se remontan a la segunda mitad del siglo XVIII, cuando el húngaro Wolfgang von Kempelen construyó una "máquina parlante" que producía palabras rudimentarias por medio de un complicado montaje de fuelles, lengüetas, silbatos y cámaras de resonancia.

En los años setenta del siglo XX, merced a la computación digital, la primera generación de conversores de texto en habla ("text-to-speech") modernos alcanzaron una amplia difusión. Trataban de emular el proceso fisiológico de producción de la voz humana a partir de un número reducido de parámetros. El conversor típico constaba de un generador de audio, que desarrollaba la función de la laringe, y un filtro de audio, que representaba el resto del tracto vocal. El sistema ajustaba continuamente las características físicas del sonido (resonancia, ancho de banda, periodicidad y frecuencia fundamental) a fin de crear la secuencia de sonidos que componen el habla.

Se logró así sintetizar un habla inteligible, aunque de sonido mecánico. Un primer ejemplo de producto comercial que incorporaba esa técnica fue "Speak & Spell" (Habla y deletrea), un juguete lanzado al mercado en 1978. Dada su sencilla manufactura y capacidad de generar frases inteligibles con extrema

prontitud —hasta 600 palabras por minuto— todavía hoy se emplean estos sintetizadores. Resultan de gran utilidad a quienes, como los invidentes, prefieren sacrificar la naturalidad del habla por su rapidez.

El aumento de la velocidad y el abaratamiento de la memoria de los ordenadores, a finales de los años noventa, condujeron a la fabricación de los más avanzados sintetizadores actuales. Operan a partir de un conjunto de unidades lingüísticas, o fonemas, que se colocan uno detrás de otro para formar la palabra deseada. La palabra "school" (escuela), por ejemplo, se compone de cuatro fonemas: S, K, OO y L en la notación fonética inglesa. (Cada idioma contiene un número distinto de fonemas: el inglés se acerca a 40, el japonés ronda los 25, el alemán 44 y el español 24, cinco vocales y diecinueve consonantes.) A semejanza de los antiguos cajistas que colocaban ordenadamente en bandejas las letras de metal para obtener palabras impresas, los sintetizadores actuales ensamblan fonemas para crear palabras habladas. Se denominan sintetizadores de concatenación, puesto que enlazan entre sí las unidades sonoras.

Obtención del corpus sonoro

La síntesis de habla por concatenación requiere una fase previa de grabación de una voz humana. Empezamos, pues, examinando docenas de locutores aspirantes. A menos que se requiera un acento extranjero —para un personaje de película o un sitio en la Red, por ejemplo— preferimos voces exentas de acentos regionales. Hablamos, obviamente, de personas que usan el dialecto estadounidense del inglés, empleado por los presentadores de telediarios. El locutor seleccionado se sienta luego en una cabina de grabación y lee en voz alta más de 10.000 frases. Esta etapa puede durar en torno a dos semanas. Las frases se eligen por su relevancia para aplicaciones prácticas y por su diverso contenido fonético; se garantiza así la obtención de un gran número de ejemplos de todos los fonemas en diferentes contextos.

De ahí se obtienen unas 15 horas de locuciones grabadas. Dado que éstas se segmentan para luego reensamblarse en otro orden, un fonema registrado un día puede terminar al lado de otro archivado una semana después. Asegurar la coherencia prosódica de esas 15 horas en su integridad no es grano de anís. Un educador de voz guía a los locutores y presta atención a sus desviaciones de ritmo, la inflexión emocional, el tono y el volumen, para ayudarles a mantener la uniformidad del habla. Al menos una vez cada hora, los locutores escuchan una frase pronunciada el primer día de grabación: lo mismo que el diapasón a los músicos, les proporciona el tono de referencia.

A continuación, un programa informático convierte en series de fonemas las palabras habladas, utilizando para ello un diccionario de pronunciación que detalla los fonemas que componen cada palabra. Se anotan las particularidades de cada fonema: cuáles son los fonemas adyacentes (el anterior y el posterior) y si constituye el inicio o el final de una palabra o una oración. Se identifica también la función gramatical de cada palabra.

Procesado el texto, el programa analiza los registros de audio. En cada uno, mide tres propiedades: tono, ritmo y volumen, que en conjunto definen la prosodia. El conocimiento de estas características de los fonemas nos ayudará a decidir qué alófonos (variantes de un fonema) son los más indicados para la síntesis de una determinada locución.

En el siguiente paso, basado en técnicas tomadas del reconocimiento de voz (programas de dictado que traducen el habla en texto), se correlaciona cada fonema grabado con el texto correspondiente. Con el sonido y el texto alineados, el programa analiza las grabaciones y delimita las fronteras de cada fonema. Se trata de una etapa clave, ya que una vez localizados y etiquetados, los fonemas se catalogan y archivan en una base de datos para que puedan luego ser recuperados.

La base de datos de nuestro sintetizador NAXPRES contiene un promedio de 10.000 alófonos grabados de cada uno de los aproximadamente 40 fonemas de la lengua inglesa. Podría parecer absurdo llevar la redundancia hasta esos niveles; pero, al combinar las palabras en frases, el volumen y el tono relativos de cada sonido varían en función del humor del locutor, de lo que quiere resaltar y del tipo de frase (nótese la diferencia entre una pregunta y una exclamación). Por tanto, los alófonos obtenidos de tales locuciones varían de forma notable en razón de las diferencias en la prosodia y en el contexto fonémico.

La extrema sutileza y complejidad del habla humana dificultan el estudio de los numerosos factores que contribuyen al sonido natural de las palabras. Se recurre por ello al auxilio de los ordenadores. A partir de las locuciones almacenadas en la base de datos se construye un modelo estadístico, del que se deducen automáticamente los parámetros que rigen la entonación, el ritmo y el volumen del habla de cada persona. Esta información se utiliza luego para conseguir que la voz sintetizada se parezca a la humana.

Procesamiento del texto

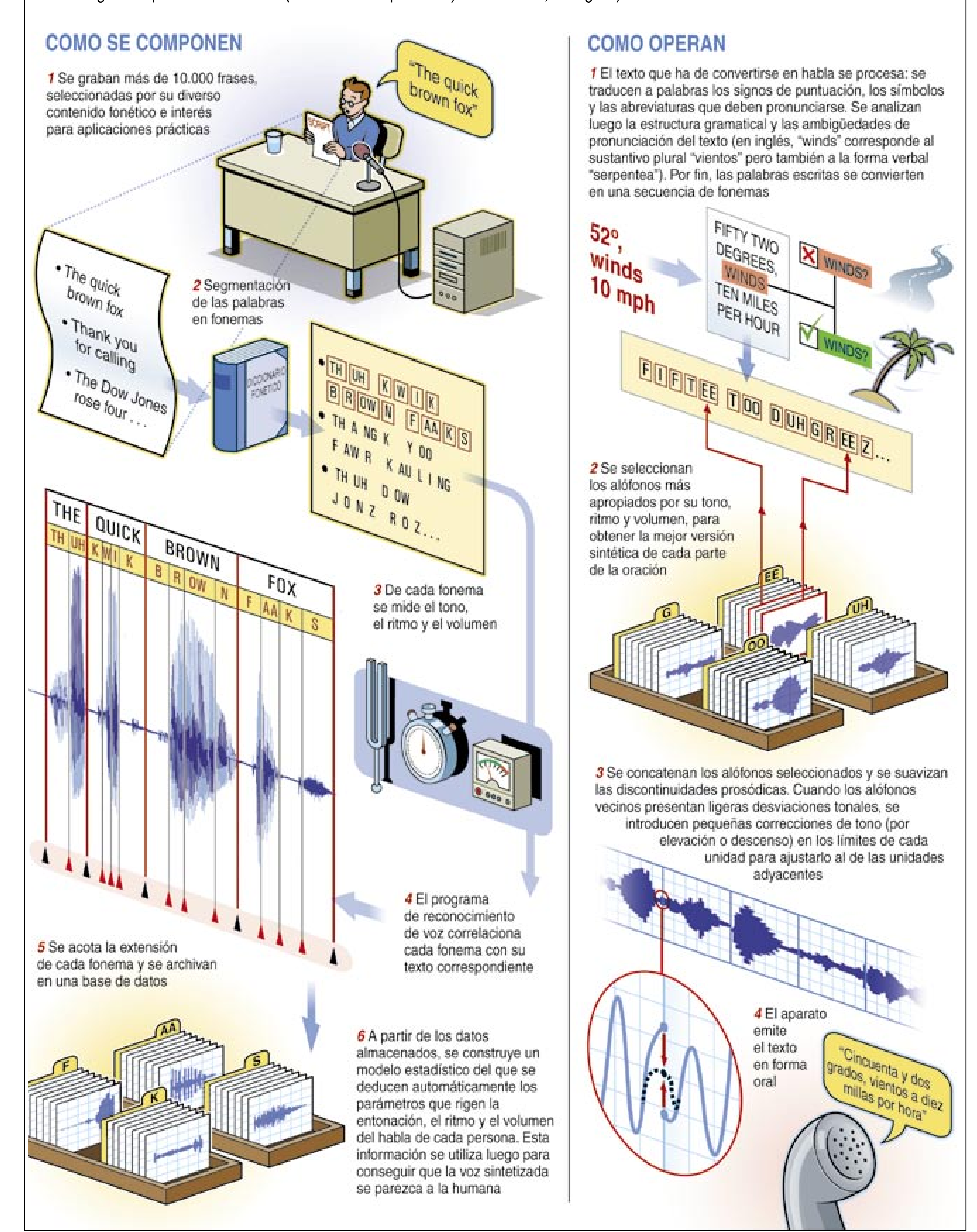
Una vez descritos los elementos de un sintetizador de voz moderno, veamos cómo opera. El sintetizador del habla de IBM realiza el proceso siguiente en cuestión de milisegundos, celeridad suficiente para que una persona dialogue con el ordenador en tiempo real. En primer lugar, se le proporciona el texto que ha de

Resumen/Hacer hablar a las máquinas

- La voz sintetizada gana terreno en multitud de operaciones cotidianas. Los expertos trabajan para que ésta remede al máximo el sonido del habla humana.
- Miles de palabras grabadas se segmentan en fonemas que se archivan en enormes bases de datos. A partir de la recuperación y recombinación de estas grabaciones, las nuevas máquinas parlantes modulan el tono y la expresión para hacerse entender con mayor claridad.
- Estos sintetizadores de voz encuentran aplicación en los sistemas de navegación para automóviles y otros aparatos electrónicos móviles. En el futuro, los videojuegos y el cine podrán también sacar provecho del habla artificial con sonido humano.

ORDENADORES QUE HABLAN

Para que la voz sintetizada por ordenador se asemeje al habla humana, debe grabarse la voz de una persona y luego redisponer los fonemas (o sonidos componentes) para producir palabras y frases que nunca fueron dichas. (Todos los ejemplos se han mantenido en su idioma natural, el inglés.)



SAMUEL VELASCO

INVESTIGACION SOBRE CONVERSORES DE TEXTO EN HABLA (TTS)

COMPAÑIA	PRODUCTO	SITIO EN LA RED
Acapela Group BELGICA	Acapela TTS	www.brightspeech.com
Advanced Telecommunications Research (ATR) JAPON	(sin nombre)	www.slt.atr.jp
AT&T EE.UU.	Natural Voices	www.naturalvoices.att.com
Cepstral EE.UU.	Cepstral Voices	www.cepstral.com
Fonix EE.UU.	DECtalk	www.fonix.com/page.cfm?name=espeech_dectalk
IBM EE.UU.	NAXPRES Synthesizer	www.research.ibm.com/tts
iFLYTEK CHINA	InterPhonic	www.iflytek.com/english/products.htm
Infotalk HONG KONG	InfoTalk-Speaker	www.infotalkcorp.com
Loquendo ITALIA	Loquendo TTS	www.loquendo.com
Nuance EE.UU.	Vocalizer	www.nuance.com
Scansoft EE.UU.	RealSpeak	www.scansoft.com
SVOX SUIZA	SVOX-TTS	www.svox.com
Toshiba JAPON	(sin nombre)	www.toshiba.co.jp/rdc/mmlab/tech/w21e.htm

convertir en habla: por ejemplo, la frase “Permits cost eighty dollars per year” (Los permisos cuestan ochenta dólares por año). Un programa debe convertir en fonemas la información escrita. El proceso entraña mayor dificultad de lo que en principio parece, ya que el texto puede contener signos de puntuación, símbolos y abreviaturas que deben pronunciarse (en el texto del ejemplo figuraría sólo “Permits cost $80/yr.”); ante todo, pues, se traduce el texto a la secuencia de palabras que ha de pronunciar el sintetizador. El NAXPRES aplica un conjunto de reglas para eliminar ambigüedades, como las que se derivan de las múltiples maneras de interpretar una abreviatura. “St. Charles St.”, por ejemplo, contiene dos abreviaturas idénticas que deben leerse: “Saint Charles Street” (Calle de San Carlos).

Establecida la secuencia de palabras, el sistema debe averiguar cómo decirlas. La pronunciación de una palabra depende en ocasiones de su categoría gramatical. Así, por ejemplo, “permits” se pronuncia *per*mits (acento en la primera sílaba) cuando se usa como sustantivo —entonces significa “permisos”— y per*mits* (acento en última sílaba) cuando es una forma verbal (significando “permite”). Se utiliza, pues, un analizador gramatical para determinar la función que desarrolla cada palabra en la oración:

permits (sustantivo) cost (verbo) eighty (adjetivo) dollars (sustantivo) per (preposición) year (sustantivo)

El sintetizador se encuentra, ahora, en condiciones de convertir en fonemas las palabras escritas. Ha de dar cabida a todas las pronunciaciones idiosincrásicas de la lengua para la que se programa. En inglés, deben considerarse las letras mudas —la *k* de “knife” (cuchillo) o la *t* de “often” (a menudo)—, los nombres propios (el sonido inicial de “Reagan” no es el mismo que el de “real”) y los homógrafos como el ya señalado de “permits”. En inglés, es raro encontrar una frase que no contenga alguna “trampa” fonética. Para hacerse una idea de lo engañosa que puede resultar esta tarea, imaginemos todos los posibles fonemas asociados a “ough”: suena OW en “bough” (rama), AW F en “cough” (toser), OH en “dough” (pasta), UH F en “rough” (rudo) y OO en “through” (a través de).

Una vez el programa ha traducido a fonemas todas las palabras, la frase anterior se convierte en:

P ER M I T S / K AW S T / AY T EE / D AA L ER Z / P ER / Y EE R

Selección de alófonos

El fonema constituye una unidad lingüística abstracta que tiene en cada caso una realización concreta —sus variantes o alófonos— determinada por diversos factores de variación. Elegir qué alófonos deben concatenarse para construir una frase determinada constituye todo un reto. La pronunciación de una unidad lingüística varía ligeramente en función de los sonidos vecinos. Es el fenómeno de la coarticulación. La frase tomada como botón de muestra contiene 23 fonemas individuales, para cada uno de los cuales existen —en la base de datos de nuestro sintetizador— 10.000 (o 10^4) alófonos distintos. Esto da una apabullante cifra de 10^{92} combinaciones de alófonos posibles. En consecuencia, para explorar eficazmente la base de datos y determinar la mejor combinación se recurre a la programación dinámica.

Una vez que el sintetizador ha concatenado los alófonos seleccionados, queda sólo suavizar las discontinuidades prosódicas. Cuando los alófonos vecinos presenten ligeras desviaciones tonales, se oye una especie de temblor o trino. El sintetizador subsana ese tipo de problemas introduciendo pequeñas correcciones de tono (por elevación o descenso) en los límites de cada unidad para ajustarlo al de las unidades adyacentes, lo mismo que un carpintero lija las junturas encoladas para suavizar una superficie de transición.

Desarrollo futuro

¿Cuál sería el siguiente paso en la mejora de los sintetizadores de voz? ¿Deberíamos intentar que el habla de la máquina resultara indistinguible del habla de una persona? Probablemente, no. Por un lado, nadie se sentiría cómodo si sospechara que su interlocutor no es quien espera; se sentiría “engañado”. Por otro, la voz humana natural acaso no sea la más apropiada para algunos escenarios. Pensemos en las señales de advertencia para conductores o en las voces de juguetes, dibujos animados y videojuegos. Quizá sería mejor fijarse otros objetivos: una voz afable y expresiva que resultara agradable al

oído o tal vez un sistema que explotara las capacidades comunicativas de los humanos. Fijémonos en el siguiente ejemplo:

Llamante: "I'd like a flight to Tokyo on Tuesday morning" (Querría un vuelo a Tokio para el martes por la mañana).
Ordenador: "I have two flights available on Tuesday *evening*" (Tengo dos vuelos disponibles para el martes *por la tarde*.)

Si el programa hiciera hincapié en la palabra "evening" (tarde) en contraste con "morning" (mañana), el diálogo se simplificaría enormemente. El llamante entendería entonces que no hay vuelos por la mañana y que el ordenador le ofrece una opción alternativa. Si la respuesta fuera totalmente inexpresiva, en cambio, el llamante podría suponer que la máquina no ha entendido su pregunta y que debe repetirla. Si en el mismo ejemplo hubiese que responder "I'm sorry, there are no flights available on Tuesday" (Lo siento, no hay ningún vuelo disponible para el martes), sería deseable que la voz mostrara una entonación de disculpa por la ausencia de vuelos, o al menos que no sonara tan jovial como el "How may I help you?" (¿En qué puedo ayudarle?) con que suelen recibirnos los contestadores automáticos.

Nuestro equipo de IBM ha desarrollado recientemente nuevos prototipos capaces de incorporar en su habla expresiones orales de esta índole. Además de la expresión básica, en tono neutro, la técnica permite sintetizar una frase que suene alegre, interrogante o exculpatoria, y también resaltar palabras aisladas para lograr un efecto especial.

Aun cuando los sintetizadores de voz actuales ya se aproximan asombrosamente al habla humana, la técnica se plantea otro gran reto: mejorar la expresividad. Téngase en cuenta que el programa informático no comprende lo que está diciendo; por ello no habla con los matices e inflexiones orales que cabría esperar de un alumno de secundaria, que sí interpreta lo que lee. Dada la complejidad de la voz humana, la investigación sobre el habla sintetizada sin duda se encuentra ante un campo de actuación inmenso.

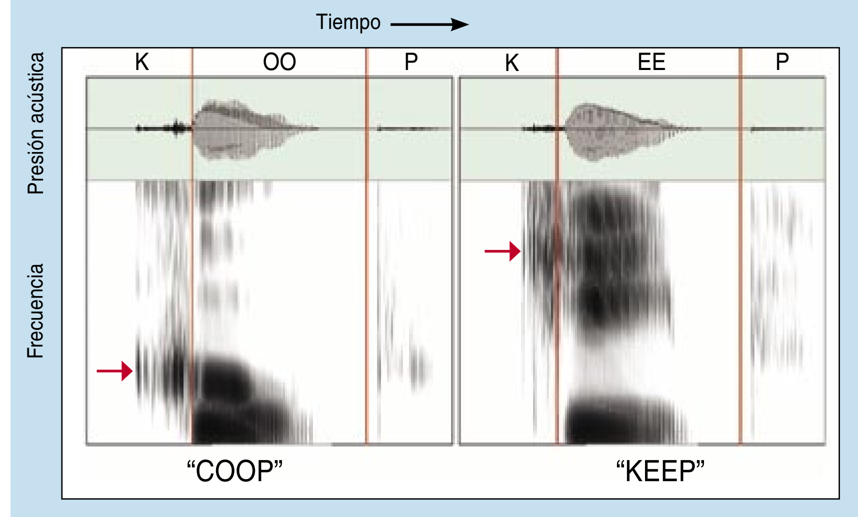
ANDY AARON Y RAIMO BAKIS

Alófonos: variaciones sobre un mismo fonema

Para sintetizar un habla de sonido natural, las máquinas deben concatenar las unidades lingüísticas como lo hace una persona al hablar. Por ello deben tener en cuenta que la pronunciación de un fonema varía ligeramente en función de los sonidos vecinos. Esta coarticulación ocurre al empezar a colocarse la lengua y la cavidad bucal en posición de emitir el siguiente sonido antes de terminar el primero. Por ejemplo, cuando alguien pronuncia el fonema K en "keep" (guardar), la lengua ya se está adelantando, en anticipación del fonema EE; en cambio, en la palabra "coop" (corral), iniciada con el mismo fonema K, la lengua se desplaza hacia atrás, anticipando el fonema OO. (Ejemplos análogos en español serían los fonemas iniciales de "kilo" y "cubo".)

La coarticulación añade complejidad a la síntesis del habla. Un inglés, por ejemplo, oye K, P y T como tres sonidos (fonemas) distintos. Sin embargo, hay gran diferencia entre el sonido K en "coop" y en "keep"; en realidad, tanta como entre cualquiera de ellos y P o T. Para percibir la diferencia entre estos alófonos del fonema K, pidamos a alguien que empiece a pronunciar "keep" o "coop", pero que emita sólo el sonido K: así sabremos cuál es la palabra que ha iniciado. Las personas estamos acostumbradas a oír todas las K iguales entre ellas y distintas de las P y las T. Pero en la síntesis de voz deben considerarse estas sutiles variaciones fonéticas: en cada caso ha de utilizarse el alófono correcto, de otro modo se producirá un sonido falso.

No sólo el contexto afecta a la pronunciación de un fonema: importa también su disposición en sílabas y palabras. Un ejemplo clásico es la comparación de "gray train" (tren gris) con "great rain" (llover a cántaros). A ambas expresiones les corresponde la misma secuencia fonémica: G R AY T R AY N; pero la pronunciación es distinta en cada caso. En "gray train", la T suena como una explosión de la lengua hacia el frente del paladar, típica de la T al inicio de una palabra (oclusiva dental sorda). Pero en "great rain", al encontrarse al final de una palabra, T puede producirse sin ninguna explosión.



LOS AUDIOGRAMAS muestran dos alófonos del mismo fonema K (*flechas rojas*), determinados por la ligera variación en el movimiento que la lengua realiza para anticipar el sonido siguiente.

Los autores

Andy Aaron, Ellen Eide y **John F Pitrelli** trabajan en la síntesis de voz en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. Aaron estudió física en la Universidad Bard; después trabajó en la elaboración de bandas sonoras para diversos estudios cinematográficos. Eide, tras doctorarse en informática e ingeniería eléctrica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se dedica a los modelos estadísticos y al reconocimiento y síntesis de voz. Pitrelli, también doctorado en esas disciplinas en el MIT, centra su labor en la síntesis de voz, la prosodia y el reconocimiento del texto manuscrito y de la voz.

Control celular de la integrina

Bases estructurales

Las integrinas forman una familia de receptores de adhesión celular esenciales en procesos biológicos de gran relevancia como la migración, la supervivencia y el control de la proliferación celular. Son glicoproteínas, proteínas "decoradas" con azúcares. Localizadas en la superficie de las células, reconocen y se unen selectivamente a moléculas presentes en la matriz extracelular o en la superficie de otras células.

En el interior de la célula, las integrinas establecen conexiones con las redes de filamentos que constituyen el citoesqueleto. Estos receptores enlazan sistemas fuera y dentro de la célula, de ahí su nombre de integrinas, y median la transmisión de señales entre ellos.

Las integrinas constan de dos cadenas polipeptídicas, una subunidad α y otra β. Cada subunidad tiene tres zonas diferenciadas: una región extracelular, que comprende aproximadamente el 90 % de cada molécula; un segmento, que atraviesa la membrana plasmática, y una región intracelular generalmente corta (de 20 a 50 aminoácidos).

La estructura cristalográfica de la región extracelular de la integrina αvβ3 tiene una zona de "cabeza" y dos "piernas". La "cabeza" alberga el sitio de unión al ligando y en ella se establece un extenso contacto entre ambas subunidades. Las dos "piernas", cada una correspondiente a una subunidad, constan de varios dominios (módulos estructurales) que enlazan la "cabeza" con los segmentos transmembrana. Las regiones intracelulares median la interacción entre las integrinas y el citoesqueleto, y entre aquéllas y proteínas señalizadoras.

Modelo de activación de integrinas por talina. En estado no adhesivo (*izquierda*) la interacción entre las colas citoplasmáticas mantiene al receptor en una conformación de baja afinidad. La unión del dominio PTB de talina a la subunidad β induce la disociación de las colas citoplasmáticas de la integrina y el cambio del receptor a un estado de alta afinidad (*centro*). La interacción homóloga entre las regiones transmembrana de ambas cadenas podría estar implicada en la aglutinación de los receptores (*derecha*).

En razón de la capacidad de unión a su ligando extracelular, las integrinas pueden adquirir dos estados: uno, inactivo o no adhesivo (baja afinidad), y otro, activo o adhesivo (alta afinidad). El carácter dinámico de la función de las integrinas requiere un control preciso del estado de activación de las mismas.

La afinidad de la región extracelular por su ligando se halla controlada por las regiones intracelulares. En el estado de baja afinidad, las regiones citoplasmáticas de las subunidades α y β interaccionan y crean una "pinza". La disociación de las colas citoplasmáticas se traduce en la separación de las regiones transmembrana y de las "piernas" extracelulares. Estos cambios se transmiten a la región de "cabeza", que cambia su forma a un estado de alta afinidad por el ligando.

La estructura tridimensional del heterodímero de las colas citoplasmáticas de la integrina αIIbβ3 se ha resuelto mediante espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN). La interacción entre ambas cadenas se produce en las zonas próximas a la membrana, que adoptan una conformación de hélice-α. Los extremos carboxilo terminal de ambas cadenas presentan una conformación desordenada; no participan en la formación de la "pinza" α β. Mutaciones introducidas en aminoácidos clave para el mantenimiento de este "velcro" entre subunidades inducen la activación intrínseca de la integrina.

Las rutas de señalización intracelular pueden controlar el estado de activación de las integrinas, al regular interacciones específicas entre moléculas efectoras y las colas citoplasmáticas de estos receptores. Se conoce un nutrido repertorio de proteínas que pueden unirse con las regiones citoplasmáticas de las integrinas. Sólo recientemente se ha comenzado a comprender los mecanismos de reconocimiento molecular que gobiernan la activación de integrinas.

La talina, una proteína que se colocaliza con integrinas activadas, puede

unirse directamente a la subunidad β de integrinas, a los filamentos de actina y a otras proteínas que se enlazan con la actina. La región amino terminal o "cabeza" de talina contiene un dominio PTB (siglas de la expresión inglesa para designar una unión a fosfo-tirosina); se trata de una zona suficiente y necesaria para unir y activar integrinas. La reciente elucidación de la estructura de un fragmento de la "cabeza" de talina formando un complejo con un segmento de la cola citoplasmática de la integrina β3 ha permitido conocer los detalles de esta interacción.

El dominio PTB de talina reconoce la secuencia de aminoácidos ^{739}WDTANNPLY^{747} de la cola β. En esta secuencia hay dos aminoácidos clave para la unión. Por un lado, la tirosina 747 (Y747) interacciona con una cavidad en la superficie de talina. Por otro lado, la cadena lateral aromática del triptófano 739 (W739) se inserta en un bolsillo del dominio PTB. La interacción de este aminoácido es clave para el reconocimiento entre talina y las integrinas; otras integrinas β tienen un residuo aromático en esa misma posición. La mutación de los residuos W739 o Y747 impide la unión y la activación mediada por talina, fenómeno que induce a pensar que forman parte del principal sitio de unión de talina a la subunidad β.

¿Cómo se traduce la unión de talina en la activación de la integrina? La secuencia ^{739}WDTANNPLY^{747} se encuentra en el extremo carboxilo terminal, tiene una conformación desordenada en el complejo α β integrina y no participa en la interacción entre las dos subunidades del receptor. La unión de talina desestabiliza la "pinza" de α β integrina mediante dos posibles mecanismos: mediante el reconocimiento de un sitio de unión secundario en la región de la cola β próxima a la membrana que compita con la subunidad α, o mediante la transmisión de un cambio conformacional que inhibe la interacción α β.

La activación del receptor mediante la disociación de las colas citoplasmáticas parece ejercer un efecto adicional. Las regiones transmembrana de ambas subunidades tienden a asociarse homólogamente en membranas cuando no están en presencia de la otra subunidad. Esto sugiere que la disociación inducida por talina podría traducirse en una agregación de los receptores en la superficie celular mediada por la interacción de sus regiones transmembrana. Esta hipótesis relaciona el aumento de la afinidad por el ligando con la aglutinación de los receptores y sugiere que ambos efectos podrían ser regulados por talina.

José M. de Pereda
Centro de Investigación del Cáncer
Universidad de Salamanca-CSIC

El origen de los elementos

Litio, WMAP y la gran explosión

Llamamos primordiales a los elementos que, una vez constituidos los protones, o núcleos de hidrógeno, se produjeron en los primeros minutos subsiguientes a la gran explosión. Se trata del deuterio, el helio-3, el helio-4 y el litio-7. El valor de la concentración relativa de estos elementos constituye uno de los pilares observacionales sobre los que se asienta la hipótesis de la gran explosión. La teoría de la nucleosíntesis primordial, vinculada a la teoría de la gran explosión, predice el valor de dichas concentraciones en función de la concentración de hidrógeno, así como en función de la densidad de bariones. Bariones son los protones y neutrones, que dan cuenta de la mayor parte de la masa de la materia ordinaria del universo. Los bariones están compuestos de quarks, que junto con los leptones forman los dos grandes grupos de partículas elementales.

En 1982, François y Monique Spite, del Observatorio de París-Meudon, descubrieron que la concentración, o "abundancia", de litio (Li) en las estrellas enanas pobres en metales que se hallan en el halo galáctico de la Vía Láctea y cuyas temperaturas en superficie superan los 5600 grados kelvin, es independiente de su metalicidad. (En astrofísica, "metal" designa cualquier elemento más pesado que los primordiales.) Para los astrónomos franceses, ese fenómeno demostraba que el litio observado en las estrellas enanas era el mismo Li creado en los primeros minutos del universo.

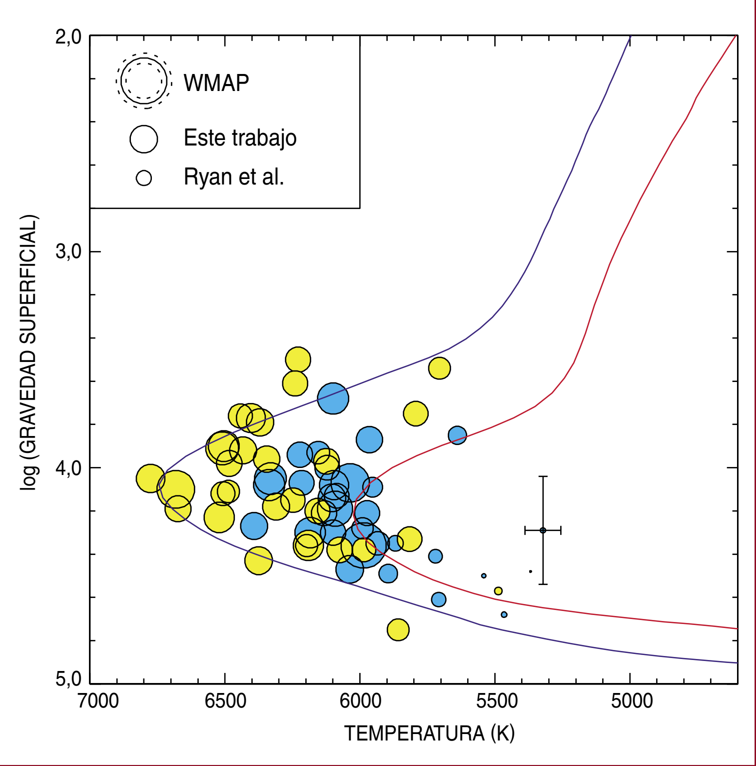
La Vía Láctea estaba constituida inicialmente por materia primordial, sin metales. Las explosiones de supernova la han ido enriqueciendo con elementos más pesados. Las estrellas más pobres en metales son, pues, las más antiguas. Si en las estrellas enanas la abundancia de Li es independiente de la metalicidad de las mismas, ello indicaría que la evolución química de la galaxia no ha alterado la abundancia de Li primordial. En otras palabras, el litio observado en estrellas deficientes en metales sería una reliquia de la gran explosión.

En la época del descubrimiento de los Spite, se estaba todavía lejos de conocer bien algunos parámetros de importancia cosmológica. Los astrónomos recurrieron a un análisis inverso, que les permitió inferir, a partir de la concentración de litio en las estrellas del halo, ciertas propiedades fundamentales del universo. En honor de los astrónomos franceses, a la constancia de la abundancia de litio en las estrellas pobres en metales se la denomina "meseta Spite del litio".

Desde el trabajo de los Spite se han multiplicado las investigaciones sobre la concentración de litio en las estrellas de baja metalicidad. Según Sean Ryan, de la Universidad a Distancia de Inglaterra, las estrellas del halo más deficientes en metales presentan también una menor abundancia de litio. Con otras palabras, la meseta del litio no correspondería al litio primordial. Si extendemos ese planteamiento hasta una metalicidad cero, es decir, hasta que sólo haya litio primordial en el astro en cuestión, Ryan y su equipo calcularon que habría del orden de diez mil millones de núcleos de hidrógeno por cada uno de litio primordial.

La misión WMAP de la NASA ha realizado varias mediciones de la radiación cósmica de fondo. (Las siglas WMAP abrevian, justamente, la expresión: Sonda Wilkinson de la Anisotropía en Microondas.) Se ha determinado con fina precisión la densidad bariónica del universo, lo que a su vez hace posible predecir

En la figura se muestran las estrellas analizadas (*círculos en colores*) en un diagrama de Hertzsprung-Russell. Este constructo relaciona la temperatura de la superficie de una estrella con su luminosidad o, como aquí, con una medida relativa de la fuerza de la gravedad en su superficie, que depende de su masa y su radio. Las curvas predicen la evolución estelar. Muestran la posición esperada de estrellas viejas muy pobres en metales (*curva en azul, correspondiente a una metalicidad mil veces inferior a la solar*) y moderadamente deficientes en metales (*curva en rojo, para una metalicidad diez veces menor que la solar*). También se muestra la barra de error típica para la temperatura y la gravedad en superficie. Los círculos de color amarillo corresponden a estrellas más pobres en metales que los de color azul. El radio de los círculos es proporcional a la abundancia de litio. Como puede verse, en estrellas muy frías el Li primordial ha sido destruido por procesos asociados a la evolución estelar; para estrellas con temperatura mayor a 6000 grados kelvin, el Li primordial se ha debido de conservar. El tamaño de los círculos transparentes en el recuadro superior indica la abundancia primordial predicha por la misión WMAP (*los círculos punteados son barras de error*), la encontrada en nuestro trabajo y la abundancia propuesta por Ryan.



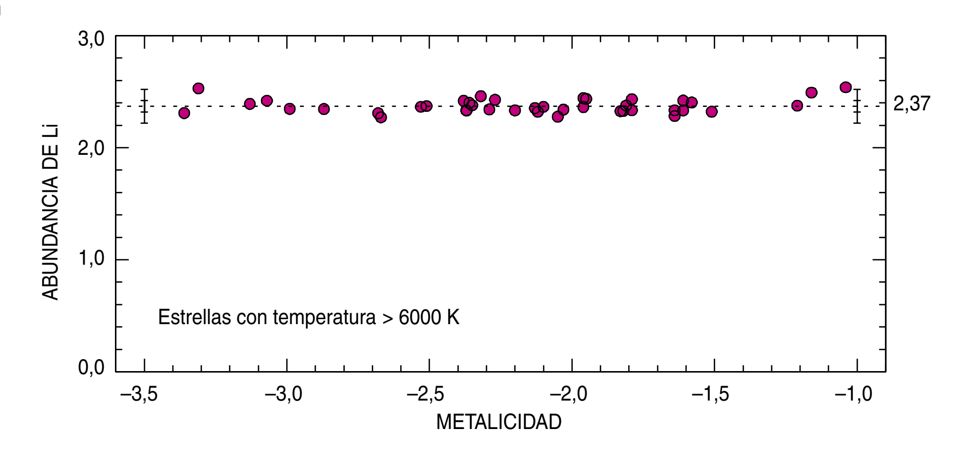
la abundancia primordial de litio. El valor que se obtiene supera, de lejos, el propuesto por Ryan.

Debemos recordar que los astrónomos no miden directamente la concentración de los elementos a partir de un espectro observado. La determinación de la composición química depende del modelo teórico con que se represente la estrella y de los componentes que la integren. Un componente fundamental para el análisis químico de la estrella es su temperatura. En nuestro caso, las líneas espectrales del litio son muy sensibles a la temperatura. Importa, pues, conocerla bien.

Hace unos tres años comenzamos en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), en Lima, un proyecto para determinar la temperatura de estrellas de los tipos F, G y K que se encuentran en regiones poco estudiadas. Se sabe que la temperatura de estos tipos espectrales se halla entre 7000 y 4000 kelvin. Nuestra investigación se basó en el trabajo de Angel Alonso, del Instituto de Astrofísica de Canarias. Con sus colaboradores mejoró, hace unos 10 años, la escala de temperatura de estas estrellas gracias al método del flujo infrarrojo. Con dicha técnica se obtienen temperaturas que apenas dependen de los modelos adoptados. Con nuevos datos, la hemos vuelto a mejorar.

Al usar la nueva escala, comprobamos que la abundancia de litio primordial supera mucho los valores hasta ahora publicados. Tal discrepancia obedece a que nuestra escala de temperaturas indica que las estrellas de tipo F, muy pobres en metales, alcanzan una temperatura en superficie mayor de lo que se pensaba. Las temperaturas que hemos obtenido concuerdan con las esperadas, según los cálculos obtenidos con la teoría de evolución estelar, para estrellas muy pobres en metales (*recuadro superior*). Nuestro trabajo muestra que la abundancia de Li es

Abundancia de litio (Li) en función de la metalicidad para estrellas con temperatura mayor a 6000 grados kelvin. Se mide en una escala logarítmica donde la abundancia de hidrógeno es 12 (es decir, hay en estas estrellas del orden de 10^{10} átomos de hidrógeno por átomo de Li). Como se ve, es independiente de la metalicidad. La metalicidad se mide con respecto a la del Sol, en una escala también logarítmica (las estrellas de metalicidad −1, −2 y −3 tienen 10, 100 y 1000 veces menos metales que el Sol, respectivamente). La línea punteada muestra la abundancia media de litio.



independiente de la metalicidad de la estrella. Da así a entender que la meseta Spite es de origen primordial. Nuestro valor cae dentro de las barras de error del valor establecido por la misión WMAP.

Con todo, persiste una pequeña diferencia entre los resultados deducidos de los datos de WMAP y los que hemos observado nosotros. La razón de tamaña disparidad podría estribar en procesos ligados a la evolución estelar. Caben, no obstante, otras explicaciones: ingredientes cosmológicos considerados incorrectamente, nuevas partículas exóticas o hasta una reformulación de la teoría de gravitación.

Nuestra contribución para la solución de este problema ha sido demostrar que la temperatura de las estrellas de tipo F muy pobres en metales es mucho mayor de lo que se creía, y que, por lo tanto, la abundancia de litio en estas estrellas es también mayor de la que se pensaba. Sin embargo, el problema no está completamente resuelto, y la controversia sobre la abundancia de Li primordial promete dar aún mucho trabajo a los astrónomos, tanto bajo los cielos estrellados como frente al ordenador.

JORGE MELÉNDEZ
Caltech, EE.UU. y UNMSM, Perú

IVÁN RAMÍREZ
Universidad de Texas, EE.UU.
y UNMSM, Perú

Microcuásares

Recuerdan, en pequeña escala, a los cuásares de lejanas galaxias

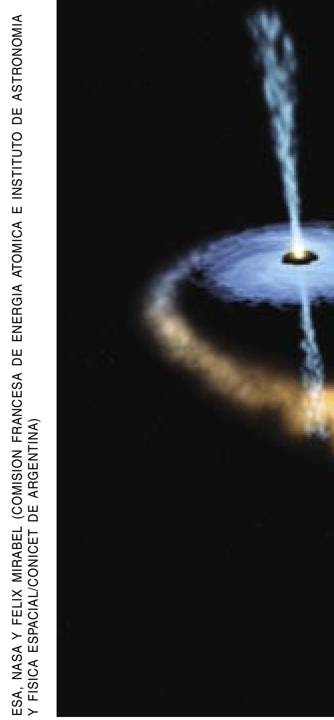
Las observaciones realizadas en los últimos años han permitido constatar la existencia de un nuevo tipo de objeto estelar en nuestra galaxia: las estrellas binarias de rayos X con chorros relativistas, también conocidas con el nombre de microcuásares. En estos sistemas, una estrella ordinaria gravita alrededor de un objeto compacto, bien una estrella de neutrones, bien un agujero negro. El objeto compacto capta masa de la estrella ordinaria y forma así un disco de acreción a su alrededor. Una fracción de la masa captada se expulsa después a velocidades relativistas, es decir, a una fracción de la velocidad de la luz lo bastante grande para que se perciban los efectos predichos por la teoría de la relatividad especial, en una dirección perpendicular al disco de acreción; se generan así los chorros que caracterizan a los microcuásares. Con la palabra microcuásar se subraya una analogía tanto física como morfológica con los chorros, también relativistas, observados en los cuásares y otros núcleos de galaxias activas (AGN). Los mecanismos físicos de la acreción y eyección de materia en un microcuásar se parecen a los que actúan en los cuásares, aunque en escalas de tiempo y distancias millones de veces menores. Por eso, el descubrimiento de los microcuásares ha contribuido a una mejor comprensión de los fenómenos de acreción y eyección en la proximidad de objetos celestes que hayan sufrido un colapso gravitatorio (que se hayan derrumbado sobre sí mismos).

El número de microcuásares conocidos en la actualidad es de sólo 15; para que pueda plantearse el estudio de los fenómenos de acreción/eyección sobre una muestra estadísticamente significativa, y no sobre una muestra restringida de objetos como hasta ahora, hay que tratar de ampliar el número de microcuásares conocido. La búsqueda de nuevos sistemas de este tipo se realiza a partir de un cruce inicial de catálogos confeccionados con observaciones en rayos X y en los intervalos de radio y óptico del espectro. Luego, se toman espectros ópticos, que determinan si los objetos escogidos en los catálogos son cuásares o microcuásares, e imágenes de alta resolución espacial en radio, que permiten detectar la estructura alargada de los chorros.

En cuásares y microcuásares se encuentran por lo normal los tres ingredientes básicos siguientes: un agujero negro en rotación, un disco de acreción calentado por disipación viscosa y chorros colimados de partículas relativistas. No obstante, entre ambos tipos de objeto existen diferencias de varios órdenes de magnitud en la masa del agujero negro, la temperatura interna del disco y el alcance de los chorros. Esa triple divergencia tiene consecuencias importantes para la observación. En particular, la escala temporal de la dinámica de los fenómenos de acreción/eyección en torno al objeto compacto es proporcional a la masa de éste. A modo de ejemplo podemos citar que en el microcuásar GRS 1915+105 se ha descubierto una simbiosis o conexión entre el disco de acreción y el chorro relativista en escalas de tiempo de algunos minutos, mientras que en el cuásar 3C 120 se ha detectado un acoplamiento parecido con escalas temporales de algunos años.

Por otro lado, la proximidad de los microcuásares, dentro de nuestra galaxia, también facilita que en los fenómenos de eyección de chorros colimados se pueda detectar tanto el chorro que se aproxima al observador como el que se aleja. Este último es apenas visible en los cuásares, debido a la práctica supresión de su brillo por fenómenos de aberración relativista, que, por el contrario, amplifican la emisión del chorro que se aproxima hacia el observador y posibilitan así su detección, aunque estén a distancias cosmológicas (es decir, que su luz ha tardado en llegar hasta nosotros una parte considerable del tiempo transcurrido tras la gran explosión).

Los microcuásares proporcionan un excelente laboratorio para el estudio del flujo de materia y partículas en el seno del intenso campo gravitatorio de un agujero negro o una estrella de neutrones. Cerca del objeto compacto, el material atraído hacia el disco de acreción está sumamente caliente y emite en rayos X (los fotones correspondientes tienen una energía de 0,1-10 keV); los electrones que se aceleran durante la acreción pueden radiar también, de manera no térmica, al moverse a gran velocidad dentro de un campo electromagnético —emisión de sincrotrón—, en rayos X y rayos gamma (0,001-10 MeV). También el material eyectado desde el objeto central a velocidades relativistas emite en las regiones de radio, infrarroja y, posiblemente, óptica y de rayos X del espectro mediante el mecanismo de



Representación artística de un sistema estelar binario donde una estrella compacta (agujero negro o estrella de neutrones) captura masa de una estrella compañera brillante y eyecta perpendicularmente parte de ella a velocidades relativistas.

ESA, NASA Y FELIX MIRABEL (COMISION FRANCESA DE ENERGIA ATOMICA E INSTITUTO DE ASTRONOMIA Y FISICA ESPACIAL/CONICET DE ARGENTINA)

la emisión de sincrotrón. Por último, la estrella compañera y las partes externas del disco de acreción radiarán en el rango óptico y ultravioleta; en este último caso, mediante reprocesamiento de la emisión de más alta energía producida en la parte interna del disco.

Otro aspecto de gran interés ha sido la reciente constatación de que los microcuásares permiten estudiar las explosiones de supernova (o su ausencia) en estrellas integrantes de sistemas binarios. Gracias a la emisión de radio que muestran los microcuásares, se pueden obtener movimientos propios precisos de estos objetos en el plano del cielo mediante técnicas interferométricas en radio (VLBI). Combinando estos resultados con la velocidad radial deducida de los espectros ópticos, se halla por fin la velocidad espacial actual de estos sistemas binarios, que puede compararse con la velocidad espacial que predicen los modelos teóricos. La comparación nos ha hecho saber que los mayores agujeros negros —sin dejar de tener una masa del orden de las masas de las estrellas— de esos sistemas (Cygnus X-1, GRS 1915 + 105) parecen haberse formado sin explosiones de supernova, mientras que cuando el objeto compacto es un agujero de masa intermedia (GRO J1655-40) o una estrella de neutrones (LS 5039, Scorpius X-1, LSI + 61303), el microcuásar nació de una explosión de supernova con fuertes pérdidas de masa por parte del sistema binario.

Rayos gamma

La astrofísica de altas energías está dando sus primeros pasos en la que promete ser una época dorada. Con los resultados obtenidos por el instrumento EGRET, a bordo del observatorio de rayos gamma COMPTON (CGRO), se elaboró un catálogo de 273 fuentes puntuales de rayos gamma con energías superiores a los 100 MeV. La mayoría de ellas sigue aún por identificar; es una asignatura pendiente de la astrofísica de altas energías. Se cree que muchas de esas fuentes podrían ser objetos galácticos compactos, entre ellos microcuásares. El descubrimiento del microcuásar LS 5039 y su muy probable asociación con una fuente EGRET no identificada apunta claramente en esta dirección.

Por otro lado, la confirmación reciente de la naturaleza de microcuásar de LSI + 61303 conduce a pensar en una población de microcuásares como parte del grupo de fuentes EGRET no identificadas. Si esto se confirmara, tendría un impacto enorme en la astrofísica, ya que daría pistas para una mejor comprensión del firmamento en rayos gamma.

Es natural que se esperen emisiones de alta energía por los microcuásares, por analogía con las emisiones gamma a energías de GeV de las que se sabe que están asociadas a chorros relativistas en núcleos de galaxias activas. Además, desde el punto de vista teórico, también se prevé la emisión de radiación muy energética por parte de los microcuásares. De ser así, su espectro se extendería desde las longitudes de onda de radio hasta, posiblemente, los rayos gamma de muy alta energía, con un rango de al menos diez órdenes de magnitud en la energía de sus fotones. Por tanto, un estudio completo de estos objetos debe recurrir a diferentes intervalos de longitudes de onda, con diferentes telescopios y detectores, lo mismo en tierra que en el espacio.

En particular, los recién inaugurados telescopios de luz Cherenkov (la emitida por partículas cargadas relativistas en medios donde la luz vaya más despacio que ellas) H.E.S.S y MAGIC, que detectan rayos gamma de energías superiores a los 100 GeV, permitirán contrastar los distintos modelos que prevén emisión de muy alta energía por los microcuásares. Los telescopios de alta energía desarrollados en Europa han abierto nuevas ventanas del espectro electromagnético durante los últimos años.

El gran interés que despiertan los microcuásares se debe, pues, a varios aspectos. Gracias a ellos podemos avanzar en el conocimiento de los fenómenos de acreción y eyección de materia alrededor de objetos compactos de un modo mucho más rápido que en el caso de los cuásares extragalácticos. Por otro lado nos permiten obtener datos significativos acerca de las explosiones de supernova que dan lugar a objetos compactos de masa estelar. Finalmente, pueden aparecer como fuentes de rayos gamma de alta energía que todavía no han sido identificadas, sin duda uno de los grandes enigmas de la astrofísica de altas energías en la actualidad.

JOSEP M. PAREDES
Universidad de Barcelona
MARC RIBÓ
CEA Saclay,
Francia

Fosa de las Shetland del Sur

Transición de un margen de activo a pasivo en la Antártida

Durante el mes de diciembre de 1997 y parte de enero de 1998, coincidiendo con el verano antártico, se desarrolló la campaña de geofísica y geología marina ANTPAC97/98 a bordo del barco oceanográfico *Hespérides*. En el marco de la campaña, se estudió el extremo del margen activo de la Fosa de las Shetland del Sur.

En las zonas activas de subducción la corteza se introduce en el manto subyacente. Hay en la punta norte de la península Antártica una pequeña zona de subducción activa que produce la Fosa de las Shetland del Sur. Junto a ella se extienden las islas Shetland del Sur, un pequeño arco insular separado del continente por un profundo valle de rift. Esta hondonada creada por varias fallas forma la cuenca del estrecho de Brandsfield y se encuentra activa en la actualidad: en ella se depositan los sedimentos procedentes de las áreas cercanas. La Fosa de las Shetland del Sur y el rift del estrecho de Brandsfield terminan hacia el sudoeste.

El margen activo del continente constituye la zona de transición entre éste y el océano. Allí se producen terremotos y volcanes asociados a una subducción activa. El margen activo da paso a un margen pasivo, una zona exenta de esos episodios violentos y donde generalmente sólo hay etapas de depósito. Tales transiciones no son frecuentes en el mundo. La zona de subducción termina, casi siempre, en un punto triple, donde se unen tres placas, o contra otro borde de placas, donde contribuye a individualizar una placa concreta.

Un margen pasivo suele proceder de un antiguo continente que se ha roto en el transcurso de un *rifting* continental, proceso de fracturación y adelgazamiento de la corteza continental que provoca su partición en dos. En esa ruptura se produce corteza oceánica. En la península, sin embargo, el margen se ha construido sobre una antigua zona de subducción ahora inactiva. Para estudiarlo construimos una malla de perfiles de sísmica de reflexión, acompañados por la toma de datos de intensidad del campo magnético, gravimétricos y de la batimetría del fondo marino.

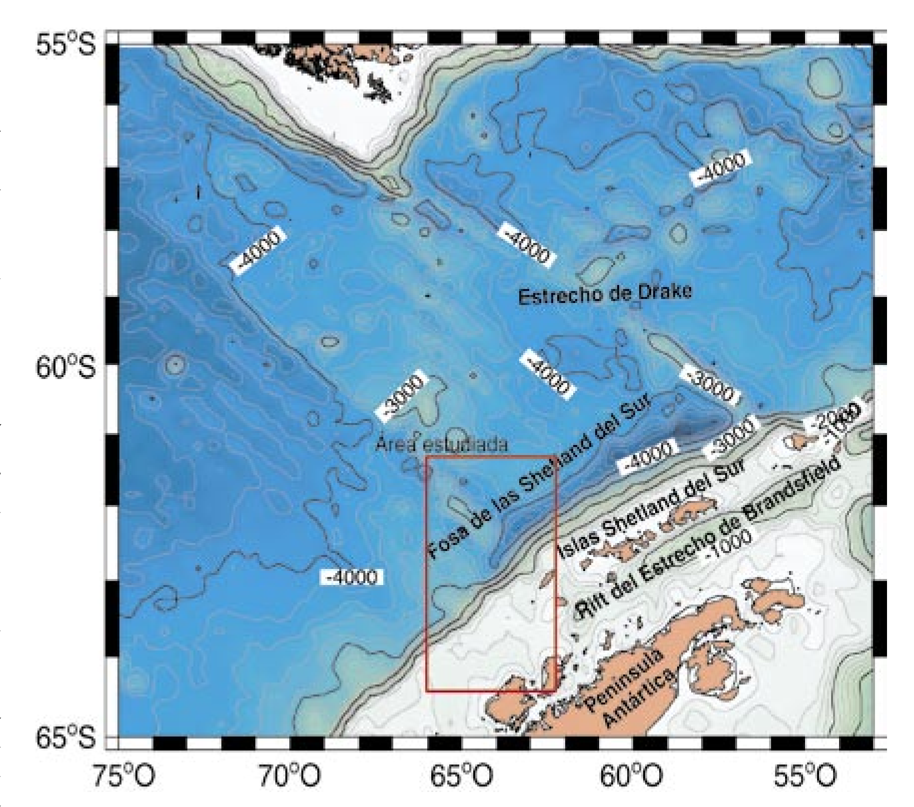
Los resultados revelan la presencia de un pequeño prisma de acreción: región en forma de prisma triangular donde se acumulan los sedimentos arrancados a la placa, que se introduce dentro del manto terrestre en el margen activo (*véase la figura 2*). Bajo el margen activo se está produciendo la subducción de la corteza oceánica de la placa Antártica situada en el océano Pacífico.

Los sedimentos de la corteza oceánica registran la evolución de las condiciones del mar desde el Mioceno Superior (11 a 5,3 millones de años) hasta la actualidad. La mayoría de estos sedimentos se están subduciendo bajo la península Antártica; no son arrancados para incorporarse al prisma de acreción.

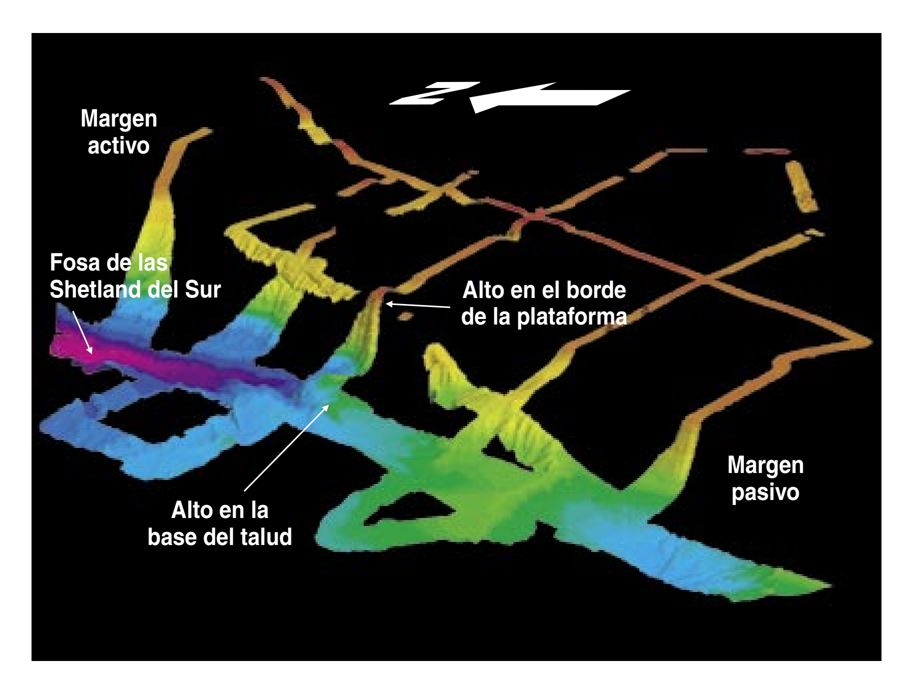
La torsión de la corteza oceánica para introducirse en el manto terrestre genera en la llanura abisal, delante de la fosa, una pequeña elevación, donde se producen fallas activas. Se está también deformando el prisma de acreción. En su parte superior presenta un pequeño surco que actúa como una cuenca *fore-arc* donde se depositan sedimentos. En un margen activo con arco de islas, ese tipo de cuencas se sitúa entre el océano abierto y el arco insular.

En el margen pasivo se observa un prisma de acreción antiguo, enterrado, que conserva muchos de sus rasgos, incluida la presencia de un viejo surco que actuó como cuenca *fore-arc*. Las capas 2 y 3 de la corteza oceánica y la parte más baja de los sedimentos de la capa 1 se sitúan bajo este antiguo prisma de acreción, mientras que los sedimentos más recientes las recubren. Los sedimentos más antiguos que cubren el antiguo prisma de acreción y que nos indicarían la edad del fin de la subducción se atribuyen al Messiniense inferior (en torno a los 6 millones de años); al parecer, contienen depósitos caóticos procedentes de caídas desde la antigua pendiente del prisma.

Hay en la corteza oceánica del área fallas inversas, fallas que pro-



1. Esquema de la batimetría de la región en torno al estrecho de Drake y el extremo norte de la península Antártica, donde se ha localizado el área estudiada.



2. Vista oblicua desde el oeste hacia el este de la batimetría, obtenida durante la campaña ANTPAC 97/98, de la terminación sudoccidental de la Fosa de las Shetland del Sur y de los dos altos batimétricos generados en la transición hacia el margen pasivo. Se obtuvo mediante sondas multihaz, método similar a un sonar, aunque, en lugar de manejar un único rayo que se refleja en el fondo, genera 159 haces dispuestos en abanico.

ducen acortamientos horizontales y aumento de espesor de las rocas al elevar el bloque superior. Dada su antigüedad, podrían tener la misma edad que la punta de la subducción en el margen pasivo.

La zona de transición registra deformaciones recientes muy importantes; promueven la desaparición del prisma de acreción y su cuenca *fore-arc*, que pasan a dar un alto batimétrico con una pendiente muy fuerte hacia el océano (más de 31º) en la plataforma. Las deformaciones provocan también la repetición de la corteza oceánica en torno a los 3500 metros de profundidad, originando otro alto, aunque éste se sitúa a mayor profundidad (*véase la figura 2*). La repetición viene causada por una gran falla inversa que rompe la corteza oceánica y la eleva sobre el fondo marino. En la plataforma continental no se observa la prolongación del *rifting* del estrecho de Brandsfield; lo sustituye un conjunto de pliegues de dirección NE-SO que acomodan un acortamiento en la corteza continental.

Las estructuras descubiertas indican un menor desplazamiento en la zona de subducción. Los acortamientos se adaptan, en torno a la fosa, en estructuras más pequeñas. Dado que la zona de subducción termina lateralmente, esta fosa no actuaría como un límite de placas, sino que sería una gran falla inversa a escala de la litosfera, que acomodaría la deformación interna de la placa antártica en el extremo norte de la península Antártica.

Antonio Jabaloy,
Jesús Galindo Zaldívar
y José Miguel Martínez Martínez
Depto. Geodinámica,
Universidad de Granada
Andrés Maldonado,
José Rodríguez Fernández,
Carlos Sanz de Galdeano
y Juan Carlos Balanyá
Instituto Andaluz de Ciencias
de la Tierra, Granada
Antonio Barnolas y Luis Somoza
Instituto Geológico y Minero
de España, Madrid
F. Javier Hernández
Depto. Geociencias Marinas
y O. D. Territorio,
Universidad de Vigo
Emma Suriñach
Depto. Geodinámica y Geofísica,
Universidad de Barcelona
Tomás Vázquez
Facultad de Ciencias del Mar,
Universidad de Cádiz,
Puerto Real

Piel artificial

por ingeniería tisular

La piel, el órgano más extenso del cuerpo humano, consta de dos tejidos: epidermis y dermis. La epidermis, o capa más externa, es un epitelio estratificado y formado en su mayor parte por queratinocitos, células dotadas de capacidad de sintetizar queratinas, proteínas estructurales.

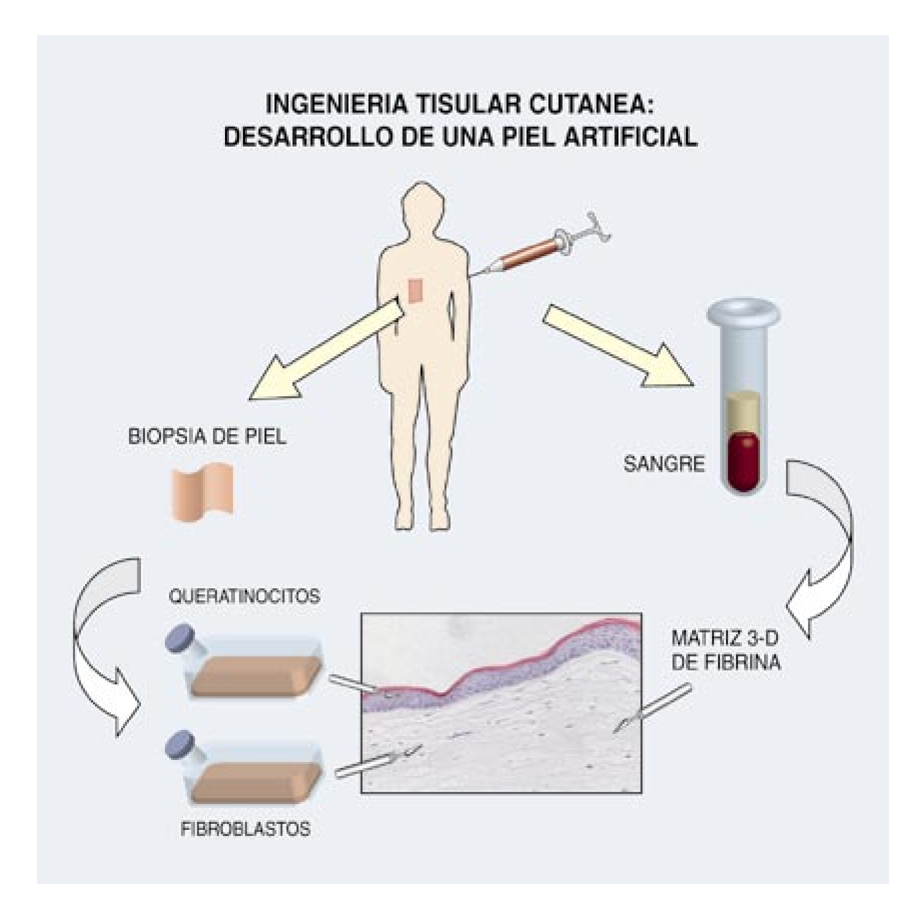
La epidermis representa la primera línea de defensa de nuestro organismo. Lo protege frente a la deshidratación, las infecciones y el daño físico en general. Cumple, pues, una función de barrera. Para llevar a cabo esa misión, la epidermis sigue un complejo proceso de proliferación y diferenciación celular. Ese proceso genera un tejido resistente a las agresiones, aunque no inerte, que se autorrenueva durante toda la vida del individuo merced a la existencia de células madre epidérmicas en el estrato más profundo de la epidermis.

La piel se puede reconstruir mediante ingeniería tisular. Durante la reconstrucción, importa mantener las células madre epidérmicas; si se perdieran, aparecería un sustituto cutáneo sin capacidad de renovarse, cuya función barrera sería sólo transitoria. La única forma de brindarle al paciente una cobertura permanente es el trasplante de un equivalente cutáneo generado a partir de sus propias células madre epidérmicas.

La piel artificial o sustituto cutáneo desarrollado mediante ingeniería tisular por los grupos del CIEMAT y el Centro de Transfusiones del Principado de Asturias consta de un componente celular y una dermis artificial. El componente celular está formado por células epidérmicas (células ma-

dre y queratinocitos diferenciados) y células dérmicas (fibroblastos). Este componente celular es de origen autólogo, es decir, se obtiene a partir del propio paciente. Por su parte, la dermis artificial consta de un sustrato rico en fibrina, obtenido a partir de plasma del propio paciente o de un donante.

Para preparar dermis artificial, hay que empezar por embeber fibroblastos en plasma. Mediante la adición de sales de calcio, se induce luego la coagulación del plasma. Con ello, los fibroblastos se distribuyen de forma tridimensional en la matriz. Sobre esta estructura se siembran, a continuación, los queratinocitos. La dermis artificial generada a partir de plasma remeda el proceso fisiológico de reparación de una herida, en donde un coágulo de fibrina rico en citoquinas dispara la respuesta reparadora que se traduce, a nivel del epitelio, en la proliferación y migración de los queratinocitos hasta cubrir el defecto. Una vez tapizada la dermis de epitelio, la piel artificial está lista para ser trasplantada (*véase la figura*).



En ensayos preclínicos se trasplantó este sustituto cutáneo humano a ratones inmunodeficientes. Los resultados demostraron con nitidez la preservación de células madre epidérmicas funcionales. Lo que se confirmó en los ensayos clínicos. Se observó en éstos una regeneración cutánea permanente a partir del trasplante de la piel artificial a pacientes quemados.

A partir de una biopsia de piel de 2 cm^2 se puede obtener, en unas tres semanas, una superficie de piel cultivada de más de 1 m^2 (una expansión de 5000 veces). La poderosa capacidad de crecimiento de los queratinocitos cultivados sobre la matriz dérmica de plasma, unida a la posibilidad de prescindir de materiales derivados de animales (las células de ratón, empleadas habitualmente para inducir la proliferación de los queratinocitos humanos, y las matrices dérmicas de colágeno bovino), así como la facilidad de manipulación de la piel artificial, puso de manifiesto el potencial de este diseño para la regeneración cutánea.

El estudio clínico en víctimas de quemaduras de gran superficie fue llevado a cabo con éxito por el equipo de Purificación Holguín, del Hospital Universitario de Getafe, en el marco de un convenio de colaboración con el CIEMAT, la Fundación Marcelino Botín y el Centro de Transfusiones del Principado de Asturias.

Se está investigando ahora el empleo de piel artificial, basada en plasma, en otras aplicaciones clínicas: tratamiento de úlceras crónicas y cobertura de defectos cutáneos agudos (piénsese en postextirpación de nevus gigantes y enfermedad de injerto contra huésped). A esta iniciativa se han sumado el Hospital Cruces en Bilbao, La Fe en Valencia, Virgen del Rocío en Sevilla, Valle Hebrón en Barcelona y Hospital General de Asturias en Oviedo.

Nuestro grupo está trabajando también con la epidermis como vehículo de terapia génica. Hemos desarrollado vectores de transferencia génica y generado queratinocitos productores de proteínas potencialmente terapéuticas. Recurrimos, para ello, a la manipulación genética de células madre epidérmicas con vectores víricos recombinantes que portaban los genes de interés.

Si se lograra transformar la piel en un biorreactor de proteínas, podríamos entonces, a partir de un "parche" de queratinocitos productores y exportadores de proteína, curar pacientes que presentan determinadas deficiencias proteicas. Nuestra mirada se centra en las lipodistrofias y las hemofilias, entre otras.

Más próxima a los ensayos clínicos se halla la terapia génica con queratinocitos aplicada a la corrección de genodermatosis, enfermedades de origen genético de la propia piel. En los últimos años se ha progresado en el conocimiento de las bases moleculares de epidermolisis ampollosa, ictiosis y demás enfermedades hereditarias severas.

MARCELA DEL RÍO,
FERNANDO LARCHER
y JOSÉ LUIS JORCANO
CIEMAT, Madrid

ALVARO MEANA
Centro de Transfusiones
del Principado de Asturias

PURIFICACIÓN HOLGUÍN
Servicio de Cirugía Plástica,
Hospital Universitario de Getafe,
Madrid

De cerca

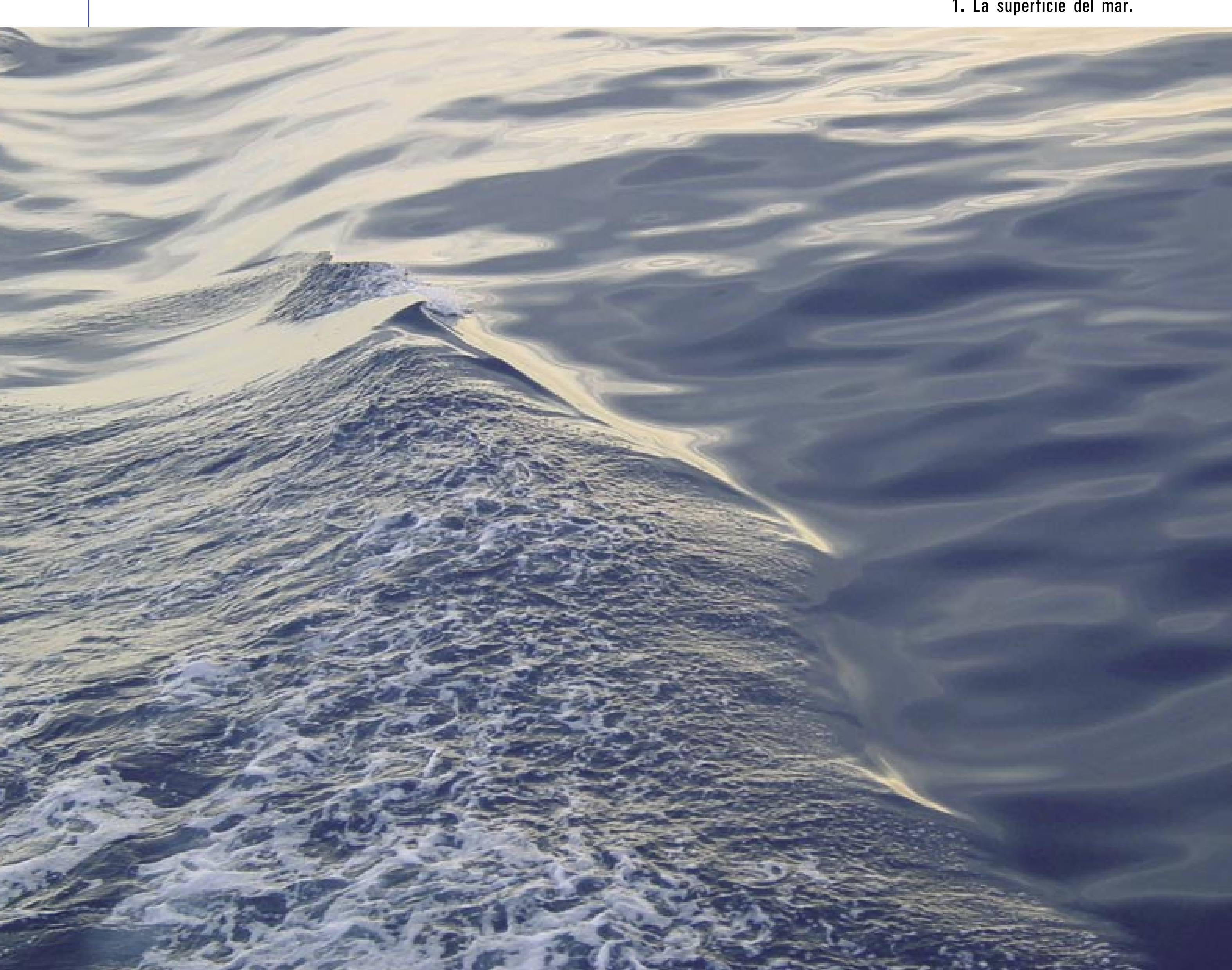
Vanessa Balagué, Irene Forn, Laura Alonso Sáez,
Julia Boras, Clara Cardelús y Elisabetta Broglio

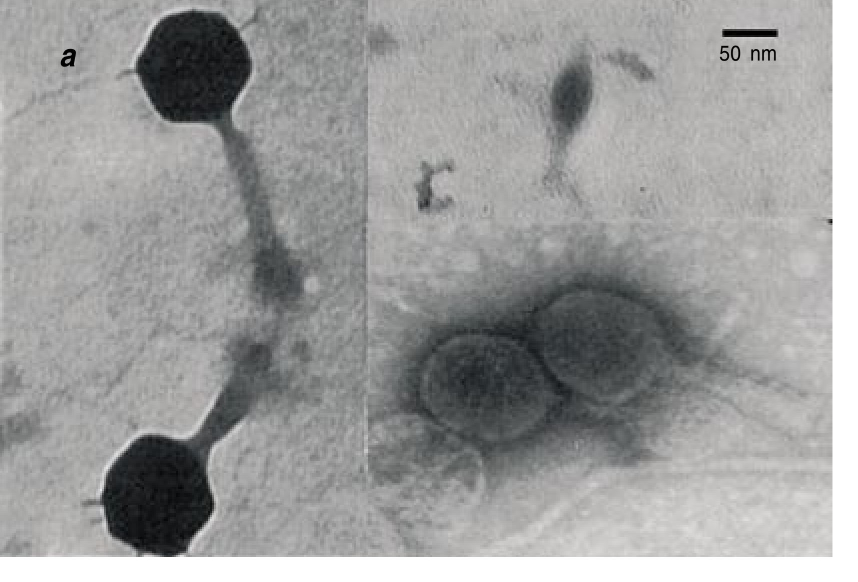
Tan pequeños y tan abundantes

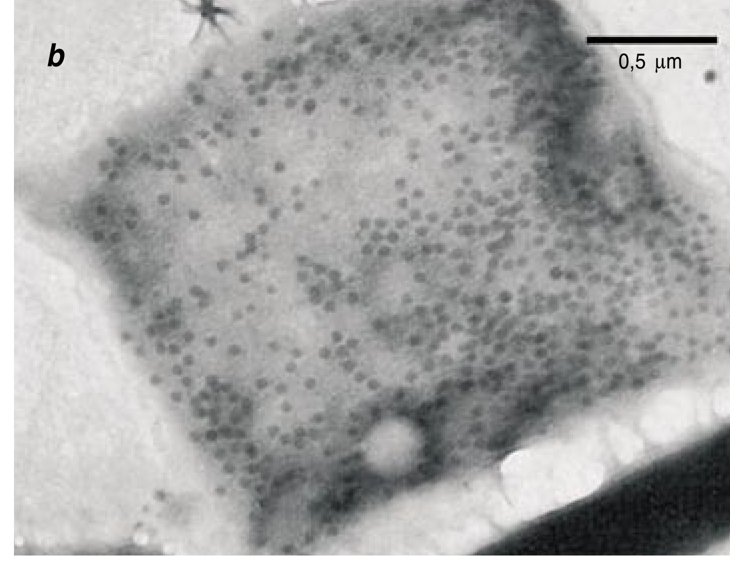
Pocas veces nos fijamos en la importancia de las cosas pequeñas. Pensemos en los microorganismos que medran en el mar. Hasta hace pocos decenios, nadie hubiera podido imaginar que el mar albergara tanta vida. Acostumbrados a ver peces, algas, medusas y otros seres de magnitudes apreciables por el ojo humano, olvidamos que en la inmensidad del mar existen sorpresas todavía por descubrir: la vida microbiana. Sólo en un litro de agua de mar se estima que puede haber miles de algas, 1000 millones de bacterias o hasta 10.000 millones de virus.

Aunque no se distinguen a simple vista, los microorganismos desempeñan una función esencial para el ecosistema marino: constituyen la base de la cadena trófica, de la que nosotros mismos formamos también parte. El 50 % de la fotosíntesis del planeta la realizan los microautótrofos marinos (algas y bacterias fotosintéticas); los microorganismos heterótrofos (bacterias y protozoos) son responsables de más del 95 % de la producción de CO_2 a partir de O_2 en el mar. Merced a las técnicas microscópicas, podemos cuantificarlos y describir su morfología. Para identificarlos, clasificarlos y averiguar cómo viven y se relacionan, debemos recurrir a técnicas más novedosas basadas en la biología molecular. Lo mismo que en otras disciplinas científicas, el complicado código genético, presente en todos los organismos, encierra la clave que va a revelarnos los secretos mejor guardados.

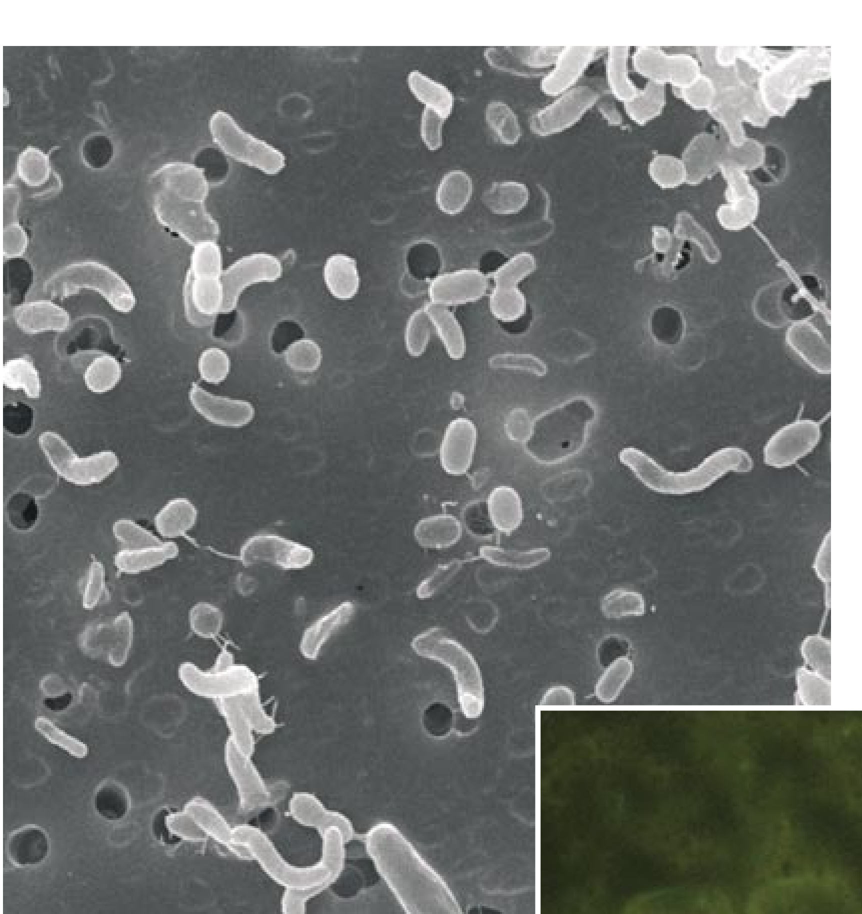
1. La superficie del mar.







2. Distintos tipos de virus (*a*) y célula procariota infectada por virus (*b*). Microfotografías obtenidas con un microscopio electrónico de transmisión.



3. Bacterias marinas (0,2-2 µm) observadas en el microscopio electrónico de barrido.

4. Diatomeas observadas en el microscopio de epifluorescencia. (La cadena mide 100 µm). La clorofila aparece en color rojo.

ELISABETTA BROGLIO (*página izquierda*); NURIA GUIXA-BOIXEREU (*arriba, a y b*); E. VAZQUEZ DOMINGUEZ (*centro*); DOLORS VAQUE (*abajo*)



Decidir ante un futuro incierto

La incertidumbre científica es con frecuencia una excusa para que los problemas a largo plazo queden en vía muerta. El cambio climático es un ejemplo. No tiene por qué ser así

Steven W. Popper, Robert J. Lempert y Steven C. Bankes

El año pasado, un grupo de expertos de gran prestigio, reunido bajo el nombre de Consenso de Copenhague, confeccionó una lista ordenada de los problemas más acuciantes de carácter social, sanitario o medioambiental que padece nuestro mundo. El grupo, convocado por el Instituto de Evaluación Ambiental de Dinamarca y presidido por Bjorn Lomborg, su entonces director, se valió del análisis de costes y beneficios para determinar los fines y lugares a los que se deberían dedicar unos recursos económicos limitados para lograr el máximo resultado. Concluyeron que habría que atribuir prioridad máxima a los problemas inmediatos con soluciones hasta cierto punto claras, como la malaria. Los problemas a largo plazo, como el cambio climático, cuya evolución, e incluso cuya gravedad, resultan mucho menos inequívocos, ocupaban posiciones bajas en la lista.

Semejantes problemas se tratan, por lo general, aisladamente, como si la humanidad pudiera permitirse el lujo de afrontarlos de uno en uno. El Consenso de Copenhague se valió de las técnicas vigentes en un intento de lograr una perspectiva más amplia. Mas, al hacerlo, puso de manifiesto hasta qué punto tales técnicas son incapaces de habérselas con un hecho elemental: el futuro es incierto. Abundan en la historia los pronósticos aventurados; se dio por indiscutible que el ser humano jamás podría volar, menudearon las previsiones catastrofistas de orden económico y medioambiental en los años setenta, hace muy pocos años se anunció que la "nueva economía" acabaría con los vaivenes económicos. Mal puede sorprender que los responsables de adoptar decisiones tiendan a fijar su atención en el próximo ejercicio fiscal, en el año que viene o en las elecciones más cercanas. Al no fiar en la brújula, cabotaje.

Tal respuesta a la incertidumbre del futuro, si bien comprensible, entraña que las amenazas planteadas a largo plazo sobre el mundo se vean dejadas de lado, o incluso agravadas por decisiones miopes. En la vida cotidiana, las personas responsables se preocupan de lo que ocurrirá muchos años después, a pesar de los apremios del aquí y ahora: hacen los deberes escolares, ahorran para su jubilación y contratan seguros. Esos mismos principios deberían sin duda ser aplicables a la sociedad en su conjunto. Ahora bien, ¿de qué modo pueden los dirigentes sopesar las urgencias del presente y equilibrarlas con las necesidades del futuro? ¿Cómo pueden evitar la parálisis que provoca la incertidumbre científica?

La ciencia puede pronosticar fiablemente las consecuencias de distintas opciones cuando se cuenta con una comprensión clara de la situación. Tales predicciones, en combinación con métodos formales de análisis de las decisiones, que utilizan modelos matemáticos o estadísticos para determinar líneas óptimas de actuación, permiten especificar las contrapartidas a que la sociedad, inevitablemente, se ve obligada, elija la línea de acción que elija. Puede que los cargos electos o los directivos de las grandes empresas no siempre se atengan a esta metodología, pero sí lo hacen más a menudo de lo que cínicamente se pudiera suponer. Las técnicas de análisis han hecho mucho por mejorar la calidad de las leyes y reglamentos, o de las inversiones. Tenemos un ejemplo en las políticas económicas nacionales. Ciertos conceptos introducidos entre 1930 y 1950 —la tasa de desempleo, el déficit por cuenta corriente o el producto nacional bruto— son de uso común en la actualidad. Los gobiernos han aprendido a moderar la brusquedad de los ciclos de expansión y recesión económicas que fueron moneda corriente en el siglo XIX y en los primeros decenios del XX.

Lo malo es que ahora el mundo se enfrenta a un conjunto de problemas, tanto a corto como a largo plazo, que distan mucho de comprenderse bien: la preservación del medio ambiente, garantizar la viabilidad futura de la Seguridad Social, la protección frente al terrorismo o la gestión del impacto de las nuevas técnicas. Estos problemas son demasiado complejos y azarosos para que los científicos puedan formular pronósticos concluyentes. Enfrentada a una incertidumbre tan profunda, la maquinaria de adopción de decisiones se bloquea. Los métodos analíticos tradicionales gravitan hacia los aspectos mejor comprendidos del problema, los más "fáciles", y tienden a rehuir los demás. Por consiguiente, incluso análisis muy refinados, como el de los expertos del Consenso de Copenhague, se ven en apuros para establecer el valor de medidas que, aunque tomadas a corto plazo, podrían moldear nuestro futuro a largo plazo.

Los tres autores —un economista, un físico y un informático, pertenecientes los tres al Centro Pardee de la Corporación RAND— hemos reconsiderado el papel del análisis desde el punto de vista de su fundamentación. Hemos construido métodos sistemáticos y rigurosos para el tratamiento de incertidumbres profundas. La idea esencial estriba en librarnos de la necesidad de formular predicciones precisas y en utilizar la informática para formular estrategias "robustas", es decir, que funcionen bien en una variedad muy amplia de futuros verosímiles. En lugar de tratar de eliminar la incertidumbre, la ponemos de relieve y buscamos después modos de gestionarla. Compañías como Volvo han utilizado ya nuestras técnicas en su planificación empresarial.

Los métodos ofrecen una forma de romper el atasco ideológico que con demasiada frecuencia se da en los

GEORGE RETSECK

órganos de gobierno. Al permitir que los órganos de decisión exploren una rica variedad de supuestos, esta nueva metodología formula de distinto modo la eterna pregunta, de imposible respuesta: ¿qué traerá el futuro a largo plazo? El nuevo planteamiento refleja mejor lo que verdaderamente nos preocupa: ¿qué acciones de hoy serán las mejores para que el futuro resulte de nuestro gusto?

Los peligros de predecir

Dar con el equilibrio entre la economía y el medio ambiente constituye uno de los principales ejemplos de lo difícil que es utilizar la ciencia para informar decisiones a largo plazo. En su libro *The Future of Life*, publicado en 2002, Edward O. Wilson hablaba del debate entre economistas y ecólogos. El primero de estos grupos suele aducir que las medidas adoptadas en la actualidad guiarán acertadamente a la sociedad en la travesía del siglo que estamos comenzando. La innovación técnica reducirá la contaminación y aumentará la eficiencia energética; los cambios de precio de servicios y mercancías garantizarán la oportuna transformación de los que hoy son recursos escasos en recursos más abundantes. El segundo grupo opone que el curso que en la actualidad sigue la sociedad demostrará ser insostenible. Para cuando las señales de estrés medioambiental sean irrefutables por manifiestas, la sociedad habrá rebasado el punto en que la recuperación resulte sencilla. Más vale ir pisando el freno ahora que tener que clavar las ruedas más adelante, tal vez demasiado tarde.

Por convincentes que parezcan los argumentos de unos y otros, es casi seguro que, en sus detalles, las predicciones detalladas de ambas partes resultarán erróneas. Las decisiones que se tomen ahora afectarán sin duda a la vida de dentro de 50 o 100 años, pero nadie puede predecir de forma creíble cómo será la vida de entonces, pese a la bondad de la ciencia aplicada para ello. Las partes interesadas ven unos mismos e incompletos datos, que juzgan según diferentes valores y supuestos, y llegan a conclusiones discrepantes. El debate puede quedar estancado y alcanzar, además, una gran acritud. Tenemos en el famoso y desprestigiado informe *Los límites del crecimiento*, publicado hace algo más de 30 años, el ejemplo perfecto de cómo fracasan los instrumentos ordinarios de análisis cuando median en tales debates. Un grupo de científicos y formadores de opinión al que se dio el nombre de "Club de Roma" pronosticó en aquellas fechas que el mundo no tardaría en agotar sus recursos naturales, a menos que se adoptasen sin demora medidas para frenar su consumo. Esta conclusión fue fruto de un modelo informático —el más perfecto de su tiempo— sobre la dinámica del uso de recursos. El informe se recibió con gran escepticismo. Desde los días de Thomas Malthus, la escasez de recursos pronosticada ha ido desvaneciéndose al lograr nuevas técnicas una producción más eficiente y encontrarse otras salidas cuando se agotaban los recursos que se habían estado utilizando. El modelo no era erróneo; sólo se utilizó incorrectamente. Todo modelo informático es por definición un reflejo simplificado del mundo real; si se pasa por alto algún factor, el pronóstico fallará. El modelo desarrollado para *Los límites del crecimiento* puso de relieve algunos aspectos importantes de los problemas que había de afrontar la sociedad. Pero al exponer sus análisis como una predicción, los autores llevaron el modelo más allá de sus límites de validez y mermaron la credibilidad de todo su programa de investigación.

Habérselas con el futuro

Los analistas, conscientes de esta flaqueza, han vuelto su atención hacia la "planificación de situaciones", técnica que explora diversos futuros hipotéticos en lugar de apostar a un solo pronóstico. Veamos, como ejemplo, el trabajo del *Global Scenario Group* (GSG), el grupo para el estudio de las circunstancias mundiales convocado en 1995 por los Institutos del Medio Ambiente de Estocolmo. Desarrolló tres familias de situaciones hipotéticas. La familia "mundos corrientes" describía un futuro en el que la innovación técnica, movida por los mercados y con una intervención discreta de los gobiernos, genera desarrollo económico sin degradar la calidad del medio ambiente. En el conjunto de supuestos llamado "caída en la barbarie", los mismos factores —innovación, mercados, política— resultan insuficientes y conducen al hundimiento de la sociedad, la proliferación de la violencia y el infortunio general. El tercer conjunto, "grandes transiciones", presenta la adopción generalizada de valores sociales "ecológicos". El GSG sostuvo que los "mundos corrientes" eran verosímiles, pero no estaba garantizada su viabilidad; para evitar el riesgo de la "barbarie", la sociedad debería tomar la senda de las "grandes transiciones".

Aunque el análisis de situaciones elude la formulación de predicciones definidas, sufre también de deficiencias propias. Se ocupa solamente de un puñado de los muchos futuros verosímiles, por lo que los escépticos pueden siempre criticar la elección de los pocos que se han tomado. Una objeción más fundamental es que las familias de situaciones hipotéticas no admiten una traducción fácil a planes de actuación. ¿Cómo deberían utilizar esas situaciones hipotéticas los responsables de tomar decisiones?

Resumen/Abordar la incertidumbre

- La ciencia ha llegado a constituir un elemento esencial en la toma de decisiones por los gobiernos y las empresas, pero la incertidumbre puede bloquear los métodos que aplican para ello, como el análisis de costes y beneficios. A menudo se acaba por no hacer nada o tomando medidas que agravan las expectativas a largo plazo.
- Los autores han desarrollado un armazón conceptual de otro tipo, centrado en la flexibilidad, que consiste en hallar, ensayar y llevar a la práctica planes de actuación que funcionen bien con independencia de lo que pueda ocurrir.
- Esos planes pueden incorporar modos de adaptarse a las circunstancias. En el caso del cambio climático, a esos efectos valdría una "válvula de seguridad" que garantizase que las reducciones en la emisión de gases tendrían lugar, pero sin resultar demasiado onerosas.

¿Deberían centrarse en el caso más amenazante o en el que los expertos considerasen más probable? Cada metodología tiene sus fallos.

La Unión Europea suele favorecer el "principio de precaución", lo que, en esencia, consiste en basar su política en los supuestos más peligrosos entre los verosímiles. El tratado de Kyoto sobre cambio climático, por ejemplo, exige reducciones en las emisiones de los gases de "efecto invernadero" a pesar de que sus efectos a largo plazo disten de conocerse con perfección. El principio de precaución es, hasta cierto punto, del todo lógico. Más vale prevenir que lamentar. El futuro a largo plazo será siempre nebuloso; puede que ciertos peligros sólo se tornen certezas cuando sea demasiado tarde para impedirlos. Pero este principio resulta



LA PLANIFICACION DEL FUTURO LEJANO es parte de la vida diaria. Por eso vamos a la escuela o contratamos un plan de pensiones. Resulta, en cambio, más difícil integrarla en la acción gubernamental o en las decisiones de las grandes empresas.

FIRST LIGHT *Corbis*

imperfecto como guía. Muchos son los posibles males que el futuro puede traernos. ¿Deberemos preocuparnos por igual de todos ellos? Pocas son las elecciones que no entrañan riesgos, y el principio de precaución puede llevar a conclusiones contradictorias. Por ejemplo, tanto los daños producidos por las emisiones de gases de efecto invernadero como el costo de reducirlas son inciertos. Para salvaguardar el entorno, deberíamos reducir las emisiones ahora mismo. Para salvaguardar la economía, deberíamos posponer dichas reducciones. Así pues, ¿qué hacer?

En EE.UU., por el contrario, son muchos los partidarios del análisis de costes y beneficios, que pone en la balanza los beneficios de eliminar cada posible daño frente a los costes que ello supone. Cuando los resultados son inciertos, el análisis de costes y beneficios los pondera con probabilidades. Parece que deberíamos estar dispuestos a pagar 500 euros para impedir un daño de 1000 euros cuya probabilidad de ocurrir fuese del 50 por ciento. El análisis de costes y beneficios proporciona respuestas inequívocas en muchos casos. El plomo de la gasolina se integra en el ambiente y afecta a los cerebros en desarrollo de los niños. Aunque no se sepa con precisión cuántos son los niños afectados, el beneficio de eliminar el plomo en la gasolina excede con mucho del coste. Pero el futuro lejano rara vez presenta elecciones tan claras. A menudo, los beneficios y los costes son tan nebulosos como para que un pequeño desacuerdo sobre la asignación de probabilidades provoque una enorme diferencia en la política recomendada.

Políticas robustas

Los instrumentos de decisión tradicionales, tales como el análisis de costes y beneficios, se fundan en el siguiente principio: "Primero se pronostica, luego se actúa." Para que los métodos de este tipo puedan determinar cuál será la política óptima en las circunstancias esperadas, es necesario que hagan primero una previsión de cómo va a ser ese futuro. Dado que estos análisis exigen que todos los implicados estén de acuerdo sobre los modelos y las hipótesis, les resulta imposible zanjar muchos de los debates más urgentes que se plantean en nuestra sociedad. Obligan a seleccionar una determinada concepción del futuro entre las muchas verosímiles y contrapuestas. Cualquiera que sea la opción elegida, será falible, bien porque se haya cometido errores, bien porque se produzcan acontecimientos inesperados.

Nuestra metodología no consiste en la búsqueda de estrategias óptimas, sino de estrategias robustas. Una estrategia robusta resiste bien la comparación con otras en un amplio abanico de futuros verosímiles. No tiene por qué ser óptima en ninguno de esos futuros; en cambio, sí ha de producir resultados satisfactorios tanto en los futuros fáciles de imaginar como ante contingencias difíciles de prever.

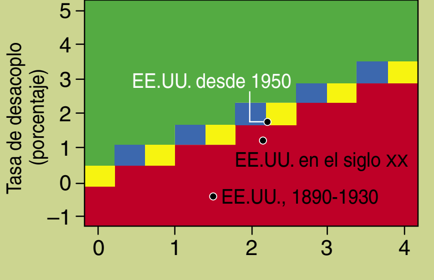
Esta metodología reproduce la forma en que las personas solemos razonar al enfrentarnos a las decisiones complicadas e inciertas de la vida diaria. Herbert A. Simon, investigador de la cognición y premio Nobel de economía, uno de los primeros en estudiar, allá por los años cincuenta, de qué modo se toman las decisiones en el mundo real, observó que los individuos rara vez tratan de lograr el resultado óptimo. Propenden, por el contrario, a buscar estrategias que funcionen suficientemente bien, que estén provistas de defensas contra una variedad de resultados adversos y que sean adaptativas. El mañana nos traerá información de la que no disponemos hoy; por consiguiente, las personas, al hacer planes, cuentan con que habrá que revisarlos.

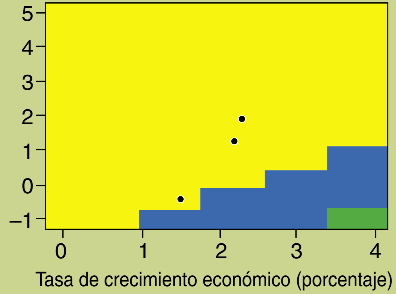
La incorporación de robustez y adaptabilidad al análisis formal de decisiones resultaba imposible en razón de su complejidad y del vasto número de cálculos necesarios. Los medios técnicos modernos han vencido esos obstáculos. De todos modos, para enfrentarse a una incertidumbre profunda no basta la potencia computacional bruta. Es necesario utilizar los ordenadores de forma diferente. Los métodos tradicionales basados en la regla de "predecir primero y actuar después" consideran el ordenador como una especie de calculadora venida a más. Los analistas seleccionan el modelo y especifican las hipótesis; el ordenador computa a continuación la estrategia óptima correspondiente a esas premisas.

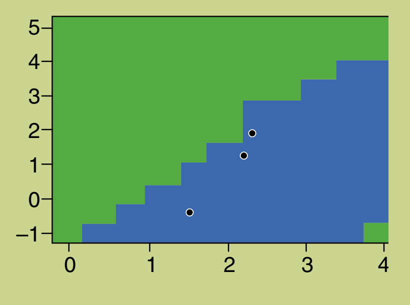
En la adopción de decisiones robustas, el ordenador es, en cambio, parte integral del proceso de razonamiento. Somete las estrategias aspirantes a "pruebas de esfuerzo": busca todas las situaciones verosímiles que pudieran derrotarlas. La adopción robusta de decisiones combina interactivamente las facultades y destrezas complementarias de humanos y máquinas. Los seres humanos son inigualables en la búsqueda de regularidades, en la extracción de inferencias y en suscitar cuestiones nuevas. En cambio, pueden dejar de reconocer hechos inconvenientes y descarriarse

EQUILIBRIO ENTRE ECONOMIA Y AMBIENTE

¿Cómo se puede limpiar el planeta durante este siglo sin provocar un desastre económico? La respuesta depende de la rapidez con que crezca la economía y de la medida en que las tendencias y reglamentos ya existentes puedan llegar a suprimir la contaminación. Ambos factores son desconocidos. Muchos de los métodos propuestos (*a la izquierda y al centro*) aportarían buenos equilibrios para ciertas tasas de crecimiento pero no para otras, mientras que una estrategia flexible (*a la derecha*) gestionaría bien una amplia variedad de supuestos. Los rectángulos de color corresponden a tasas futuras de crecimiento y "desacoplo" (el paso al que las tendencias existentes reducirían la contaminación). Los colores representan la comparación de la estrategia con las teóricamente óptimas para cada supuesto: ajuste perfecto (■), aceptable (■), malo (■) o muy malo (■). Los puntos gruesos representan tasas del pasado, que pueden proporcionar cierta indicación del porvenir.







MANTENED EL RUMBO no añade nuevas políticas ambientales. Sería un método adecuado si la tasa de desacoplo fuese elevada; en caso contrario, resulta mala.

TRATAMIENTO DE CHOQUE aplica todos los medios posibles para la limpieza. Solamente estaría justificado si la tasa de desacoplo fuese muy reducida.

LA VALVULA DE SEGURIDAD tiene el objetivo de cortar la contaminación, pero si los costos resultan demasiado elevados retrasa la fecha de aplicación. Funciona en casi todos los casos verosímiles.

JOHNNY JOHNSON

al relacionar largas cadenas de causas con sus efectos. La máquina asegura la compatibilidad entre la evaluación de las estrategias y los datos y puede descubrir situaciones que pongan en tela de juicio las presunciones a las que mayor apego se tenga. Ninguna estrategia es completamente inmune a la incertidumbre, pero el ordenador ayuda a quienes han de tomar decisiones a sacar partido de cualquier información que posean para efectuar elecciones que soporten una amplia gama de tendencias y sorpresas.

Desarrollo sostenible

Para ver cómo funciona en la práctica esta metodología, volvamos al dilema del desarrollo sostenible. El primer paso consiste en saber qué es, exactamente, lo que el ordenador debe calcular. Para que el proceso de decisión sea robusto, la máquina ha de generar múltiples sendas por las que internarse en el futuro. Deberán cubrir toda la diversidad de lo que podría ocurrir. Podemos no saber qué futuro sobrevendrá, pero es probable que cualquier estrategia que funcione bien en un rango suficientemente amplio de situaciones hipotéticas generadas por ordenador será capaz de afrontar los problemas que planteará lo que realmente llegue a ocurrir.

Nos hemos servido para el análisis del desarrollo sostenible de una versión revisada del modelo Wonderland ("País de las maravillas") creado por el economista Warren C. Sanderson, de la neoyorquina Universidad de Stony Brook y del Instituto de Análisis de Sistemas Aplicados de Laxenburg, en Austria. La simulación Wonderland incorpora, de un modo muy sencillo, el conocimiento científico relativo a la dinámica de la economía, la demografía y el medio ambiente a escala planetaria. El aumento de la población y de la riqueza aumentará la contaminación del ambiente; por otra parte, la innovación técnica puede reducirla. La contaminación, a su vez, lesiona a la economía cuando impone al medio una carga que éste no puede absorber.

Nuestra versión de Wonderland se parece a la utilizada para el informe *Los límites del crecimiento*, pero es mucho más sencilla, pues solamente utiliza 41 parámetros de incertidumbre. Tal simplicidad puede ser una virtud: la experiencia ha demostrado que si la estructura del modelo, o los datos y premisas que se le introduzcan, permanecen inciertos, no bastará añadir más detalles para lograr pronósticos más precisos. Para lograr una planificación robusta, los modelos no deben utilizarse para la predicción, sino para producir una gran variedad de situaciones hipotéticas compatibles con los conocimientos que se posean.

Los analistas pueden poner a prueba diversas estrategias y ver qué resultado dan integrando sus modelos en programas de "modelización exploratoria". El usuario humano propone una estrategia; el ordenador la compara con la óptima (la que se hubiera elegido si se tuviera una capacidad de previsión perfecta) en cada uno de las situaciones hipotéticas del conjunto, atendiendo a medidas tales como la renta o la esperanza de vida. Un proceso sistemático saca a la luz futuros en los que las estrategias propuestas funcionan mal. También pone de relieve de qué formas podría ser ajustada cada estrategia para vérselas mejor con esos futuros difíciles.

En el ejemplo de la sostenibilidad, hemos ejecutado el modelo hasta el año 2100. Dos de las incertidumbres de importancia crucial en este caso son la tasa global media de crecimiento económico durante ese período y la "tasa de desacoplo" *caeteris paribus*, es decir, la reducción en la contaminación por unidad de producción económica que tendría lugar de no adoptarse nuevas políticas medioambientales. La tasa de desacoplo sería positiva si la reglamentación existente, los aumentos de productividad y el paso hacia una

economía de servicios disminuyesen la contaminación sin reducir el crecimiento. Puede tornarse negativa si un mayor crecimiento exige el aumento de la contaminación.

El rendimiento de las diversas estrategias varía en función de estos dos parámetros. Una de las estrategias, llamada "mantened el rumbo", se limita a continuar con la política actual. Funciona bien en futuros en los que la tasa de desacoplo supera a la tasa de crecimiento, pero de ocurrir a la inversa, la contaminación acaba siendo tan grave, que los políticos se ven obligados a abandonar la estrategia y han de tratar de reparar los daños. A lo largo del siglo XX, las tasas de desacoplo y de crecimiento fueron casi iguales. De ocurrir otro tanto en el siglo XXI, el mundo bailará en una cuerda floja entre el éxito y el fracaso.

El programa "tratamiento de choque," mucho más enérgico, dedica grandes recursos al desarrollo técnico y a la reglamentación ambiental con el fin de acelerar la tasa de desacoplo. Aunque esta estrategia elimina el riesgo de catástrofe, puede exigir costos innecesariamente elevados, inhibidores del crecimiento económico.

Flexibilidad

Las dos estrategias anteriores entrañan políticas fijadas de antemano. Una estrategia adaptativa puede tomar lo mejor de una y otra. Hemos considerado una variante flexible, inspirada en las fortalezas y flaquezas complementarias de "mantened el rumbo" y de "tratamiento de choque", en la cual, aunque se imponen limitaciones estrictas a la emisión de gases, se las rebaja si resultan demasiado costosas. Esta estrategia puede ser robusta. En el caso de que los optimistas tecnológicos tengan razón y la tasa de desacoplo resulte grande, nunca se franqueará el umbral de costes y las rígidas normas de protección del ambiente se cumplirán. Por el contrario, si los pesimistas están en lo cierto y la tasa de desacoplo es pequeña, las estrictas limitaciones impuestas a la contaminación rebasarán los límites convenidos de los costes, por lo que la estrategia concederá más tiempo a la industria para cumplir la reglamentación.

Este tipo de estrategias quizá contribuya a cercenar los debates sin salida, ya que proporciona planes de actuación en cuya realización todos puedan estar de acuerdo con independencia de cuál sea la concepción de futuro que demuestre ser correcta. Nuestra estrategia adaptativa es parecida a las estrategias de "válvula de seguridad" propuestas por algunos economistas como alternativa a los objetivos inmutables de emisión acordados en Kyoto. Nuestra nueva maquinaria analítica permite a los responsables de las decisiones tanto el diseño de estrategias de esa especie como demostrar su eficacia a los diversos grupos de interés afectados.

Desde luego, incluso las estrategias adaptativas tienen su talón de Aquiles. En el caso de la válvula de seguridad, la combinación de objetivos ambientales y limitaciones de costes que mejor funciona en la mayoría de los futuros tiene un rendimiento pobre cuando la innovación técnica resulta demasiado gravosa. Para eludir este problema, el usuario puede repetir el análisis hasta acertar con una variedad de estrategias robustas, cada una de las cuales falle en conjuntos de circunstancias diferentes. Puede que una estrategia funcione bien donde otra falla, y recíprocamente, por lo que la elección entre ellas entraña inevitablemente aceptar pros y contras. El ordenador calcula cuál ha de ser el conjunto de circunstancias que justifica la elección de una determinada estrategia con preferencia a otras. Nuestro método reduce así un problema complejo a un pequeño número de opciones sencillas. Finalmente, los responsables deciden. En lugar de estériles debates sobre la elección de modelos o de otras hipótesis, las decisiones se centran en los pros y contras realmente importantes, con plena conciencia de que el futuro puede traernos muchas sorpresas.

Como es obvio, este análisis no es sólo aplicable al desarrollo sostenible, sino también a un amplio abanico de otros problemas: la introducción en el mercado de productos nuevos, la planificación de los servicios y prestaciones del estado del bienestar e incluso el terrorismo. Ni la ciencia ni la técnica pueden cambiar la esencial impredictibilidad del futuro. Sí ofrecen, en cambio, una respuesta a una cuestión distinta: ¿qué actuaciones de hoy serán las mejores para guiarnos hacia un futuro deseable? Personas y ordenadores buscan futuros verosímiles en los que una estrategia propuesta pudiera fallar, e identifican después medios para evitar esos resultados adversos.

Los fracasos de las predicciones realizadas en el pasado deberían enseñar humildad a todo el que asegure ver un camino claro en los decenios venideros. Paradójicamente, nuestra máxima influencia posible en la conformación del futuro puede que se extienda precisamente sobre las escalas temporales en las que nuestra visión es más débil. A menudo tenemos escasa influencia sobre un porvenir a corto plazo, a pesar de que está sujeto a fuerzas bien comprendidas y predecibles. Nuestros actos de hoy pueden, en cambio, ejercer sus efectos más profundos allí donde el futuro está nebulosamente definido y es impredecible. Instrumentos nuevos pueden ayudarnos a trazar el curso correcto.

CHARLES Y JOSETTE LENARS/*American Scientist*

Los autores

Steven W. Popper, Robert J. Lempert y Steven C. Bankes trabajan en la Corporación RAND, en Santa Mónica, California. Popper es economista y estudia de qué modo van las instituciones incorporando las innovaciones técnicas. Lempert es físico, y su especialidad es la política energética y medioambiental. Bankes, científico informático, ha sido padre de nuevos métodos de simulación por ordenador.

Bibliografía complementaria

ASSUMPTION-BASED PLANNING. James A. Dewar. Cambridge University Press, 2002.

SHAPING THE NEXT ONE HUNDRED YEARS: NEW METHODS FOR QUANTITATIVE, LONG-TERM POLICY ANALYSIS. Robert J. Lempert, Steven W. Popper y Steven C. Bankes. RAND MR-1626; 2003.

HIGH-PERFORMANCE GOVERNMENT IN AN UNCERTAIN WORLD. Robert J. Lempert y Steven J. Popper en *High-Performance Government: Structure, Leadership, Incentives*, dirigido por Robert Klitgaard y Paul C. Light. RAND-MG-256; 2005.

Especiación cromosómica en primates

El desarrollo de un nuevo modelo de cómo se forman las especies a partir de grandes cambios cromosómicos arroja luz sobre la separación de humanos y chimpancés

Arcadi Navarro

En su novela *Al Este del Edén*, John Steinbeck pone en boca de Lee, el cocinero chino de la familia Task y estudioso del Génesis, una frase con la que todos, alguna vez, habremos podido identificarnos: “Siento que un hombre es algo muy importante... incluso más que una estrella”. El hombre o, mejor dicho, la humanidad, su extraña naturaleza, su aterradora insignificancia y, en contraposición, sus portentosas o atroces capacidades, su accidentada historia y sus misteriosos orígenes, han centrado la vida no sólo de personajes de ficción, como Lee, sino también de multitud de científicos, filósofos y artistas.

Los orígenes de la humanidad tienen un particular atractivo, ya que desentrañarlos proporcionará respuestas a muchas cuestiones sobre qué es un ser humano. Así pues, ¿cómo y cuándo aparece la especie humana? ¿Qué mecanismos biológicos nos han distinguido entre todos los primates? Resolver estas cuestiones pasa por abordar un momento crucial de la evolución: la separación del linaje que desembocó en los humanos actuales del linaje que llevó a los chimpancés, nuestros parientes evolutivos vivos más próximos.

Al estudio de esa separación se han venido dedicando varias generaciones de científicos. En torno a la misma, se han desencadenado agrias polémicas y se promueven ambiciosos e innovadores programas de investigación. Detallados estudios sobre las pruebas fósiles y moleculares disponibles han permitido concluir que la separación de ambos linajes se produjo hace entre cinco y siete millones de años en el Africa Oriental. Sin embargo, poco más sabemos acerca de qué sucedió en esos momentos clave de nuestra evolución. Nuestra ignorancia es aún mayor sobre los restantes procesos de especiación que se produjeron a lo largo de la historia de los dos linajes, con posterioridad a su separación.

¿Qué llevó a la separación de una sola especie de primate africano en dos grupos que, posteriormente, se convertirían en nuestros ancestros y los de los chimpancés? En la región del este de Africa donde habitaban nuestros

antepasados, la tierra está dividida de norte a sur por el enorme tajo del valle del Rift. Una hendidura de casi 10.000 kilómetros, causada por el distanciamiento gradual de placas tectónicas: la placa Arábiga y las dos partes de la placa Africana. Que ese alejamiento proceda con suma lentitud no debe llevarnos a engaño sobre la magnitud de las fuerzas implicadas, capaces de hundir grandes porciones de corteza terrestre mientras las erupciones volcánicas proyectan rocas fundidas hacia la superficie.

La estructura geográfica del Rift y su violenta historia sugieren de inmediato una posibilidad: dos grupos distintos de la especie ancestral pudieron quedar aislados a ambos lados de esta monumental fisura, lo que impediría el mutuo intercambio de genes y obligaría a que cada grupo siguiera su propio camino evolutivo.

La población situada al oeste del Rift generaría a los pánidos (antepasados de los chimpancés, ya separados de los ancestros humanos). La situada al este daría lugar a los homínidos (antepasados nuestros y no de los chimpancés). Se trataría de un hermoso ejemplo de especiación alopátrida. (Llámase especiación al conjunto de mecanismos mediante los cuales se originan nuevas especies.) Parafraseando el juego cinematográfico de palabras del paleoantropólogo francés Yves Coppens, que acuñó la expresión de una "East side Story", podríamos decir que el "Edén estaba al este".

Esta afirmación resulta coherente con la visión surgida de los estudios clásicos sobre especiación, según la cual el modo más frecuente de ésta es el alopátrido. Además, es también coincidente con la distribución geográfica de los fósiles, ya que hasta hace bien poco los restos de potenciales homínidos se habían hallado siempre al este del Rift. Los paleoantropólogos admitían que tal patrón fuera mera casualidad, explicable por la pobreza del registro fósil, pero los datos son los datos y la prueba apuntaba a que dicho aislamiento geográfico estaba en la base de los orígenes de la humanidad.

Barreras geográficas frente a barreras genéticas

Pero dos líneas de investigación, pertenecientes una a la paleoantro-



1. **NOSOTROS Y NUESTROS PARIENTES** evolutivos vivos más cercanos: los chimpancés.



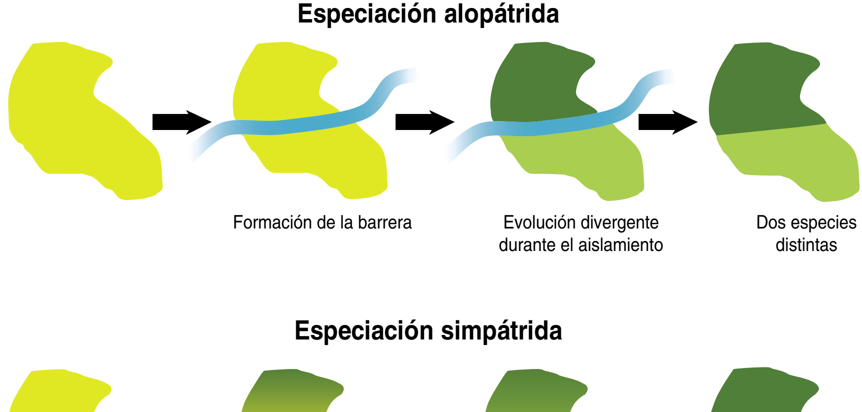
2. **AFRICA ORIENTAL**, la cuna de nuestros linajes y el de los chimpancés. El valle del Rift (*zona punteada*) pudo ser, durante largos períodos, una frontera infranqueable.

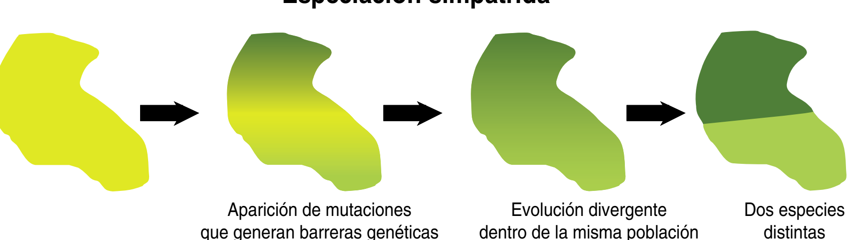
pología y otra a la biología teórica, acaban de poner en duda esa tesis. De la primera se ha ocupado ya la revista (*véase* "El más antiguo de los homínidos", por Kate Wong; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2003). En marzo de 2002, el grupo de Michel Brunet, de la Universidad de Poitiers, anunció que, durante una expedición al desierto de Djurab, habían dado con un fósil (*Sahelanthropus tchadensis*), al que apodaron Toumaï. Según Brunet, Toumaï es ya el segundo homínido fósil encontrado al oeste del Rift, en pleno "territorio chimpancé" (el mismo grupo investigador había descubierto unos años antes los restos del primero, una mandíbula de unos 3 millones de años clasificada como perteneciente a *Australopithecus bahrelgazali*).

Las características morfológicas de Toumaï han convencido a Brunet de que se trata del homínido más antiguo conocido y no, como sostienen científicos rivales, el hominoideo (antepasado común de humanos y chimpancés) más reciente de que se tiene noticia. Si éste es el caso, el modo de subdivisión de la especie ancestral no pudo ser la especiación alopátrida. La especiación no se habría producido por la acción de una barrera geográfica; habría intervenido probablemente alguna barrera genética. Esto es, se trataría de una especiación simpátrida, en que un tipo particular de mutaciones determinan que una población esté efectivamente subdividida entre aquellos individuos que portan las mutaciones y los que no, ya que estas mutaciones impiden el flujo de genes entre los subgrupos.

Sin embargo, el simple enunciado de esta especiación simpátrida abre más interrogantes de los que resuelve. Falta explicar el proceso biológico concreto, el tipo de mutaciones experimentadas. Una tarea difícil, pues los mecanismos de especiación simpátrida revisten particular complejidad: hay contados ejemplos de barreras genéticas y las pruebas que los sostienen suelen ser bastante débiles.

Más recientemente, en abril de 2003, un segundo avance, esta vez protagonizado por Nick Barton, de la Universidad de Edimburgo, y yo mismo, ha asestado un nuevo golpe a la teoría del origen de los homínidos por aislamiento geográfico. Hemos desarrollado un nuevo modelo teórico de especiación simpátrida y, tomando como base diversas pruebas provenientes de la genómica comparada, sugerimos que los linajes de humanos y chimpancés se separaron según el mecanismo que nuestro modelo propone.





3. REPRESENTACION ESQUEMATICA de las especiaciones simpátrida y alopátrida. La especiación alopátrida tiene su origen en una barrera geográfica (representada en este caso por un río) que permite a dos subpoblaciones una evolución independiente. No se cruzarán las dos especies, aun cuando, una vez seco el río (es decir, eliminada la barrera), pudieran volver a encontrase. La especiación simpátrida sucede mientras las dos especies incipientes comparten el mismo hábitat. Una vez completada la especiación, las dos especies resultantes ocupan nichos ecológicos distintos que en este caso están representados por lugares físicos distintos.

ARCADI NAVARRO

Especiación cromosómica

¿Qué tipo barrera genética hemos sugerido? Nuestra propuesta gravita en torno a un tipo de mutaciones que pueden haber actuado como desencadenante de la formación de la barrera genética: las reorganizaciones cromosómicas.

Se produce una reorganización cromosómica cuando un fragmento de ADN, que puede ser de tal tamaño que contenga centenares de genes, cambia de orden o posición en el genoma. En un proceso de reorganización, hay fragmentos de un cromosoma que se rompen y se acoplan a otro (translocaciones), cromosomas enteros que se unen (fusiones) y grandes segmentos de un cromosoma que se dan la vuelta sobre sí mismos cambiando el orden de los genes que contienen (inversiones).

Las reorganizaciones cromosómicas menudean más de lo que se pensaba hace unos años (cuando se les dio el nombre de "aberraciones cromosómicas"). Los estudios que comparan distintos géneros de *Drosophila* (la mosca del vinagre) muestran que, en cada genoma, se fija una reorganización cada millón de años aproximadamente. En la comparación de los genomas completos de humanos y ratones se ha puesto de manifiesto la existencia de, al menos, 400 reorganizaciones. Un mínimo de una reorganización cada 400.000 años lo cual, considerado en una escala evolutiva, constituye una frenética velocidad de cambio. Para hacernos una idea, nuestro genoma y el del ratón, en otros aspectos tan similares, difieren tanto en su organización como dos mazos de naipes que se hubieran barajado repetidamente a lo largo de 75 millones de años de evolución divergente.

También en el tiempo relativamente breve que nos separa de los chimpancés se han producido un gran número de reorganizaciones.

LA ESPECIACION, SUBPRODUCTO DE LA ADAPTACION

HAY POCAS AREAS DEL CONOCIMIENTO sobre las que creamos saber tanto y sepamos tan poco, como el origen de las especies. En las primeras líneas de *Sobre el origen de las especies mediante selección natural*, Charles Darwin calificaba esta cuestión como "el misterio de los misterios". Visto con un siglo y medio de perspectiva, la dedicación casi absoluta de Darwin a la cuestión del origen de las especies no pudo ser más fructífera, ni más insatisfactoria. Por un lado, Darwin demostró que sus ideas sobre la evolución de las especies eran acertadas. Estaba claro que las ramas del árbol de la vida podían transformarse y que una especie podía evolucionar hacia otra distinta mediante el efecto gradual de la selección natural. Aportó pruebas de que esto había sucedido en innumerables ocasiones en la historia de la vida en la Tierra. Pero el desconocimiento en su tiempo de los mecanismos de la herencia imposibilitaba una explicación de los mecanismos de la especiación y, en particular, dejaba sin respuesta la cuestión de la aparición de las ramificaciones en el árbol de la vida. ¿Mediante qué mecanismos una especie da lugar a dos o más especies distintas? Estos problemas le absorbieron hasta el final de sus días.

Puede entenderse esta dificultad a partir del llamado concepto biológico de especie, propuesto por Ernst Mayr, de la Universidad de Harvard. A tenor del mismo, una especie está formada por un conjunto de individuos que pueden cruzarse, compartiendo por tanto un acervo génico común, al tiempo que permanecen reproductivamente aislados de otras especies. Bajo esta definición, la especiación consiste en la evolución de diferencias que impidan la reproducción entre individuos de grupos distintos. Y aquí reside el problema: si Darwin llevaba razón y los caracteres desfavorables son eliminados por selección natural, fijándose los adaptativos, entonces cualquier característica, cualquier mutación, que impida que dos individuos se reproduzcan, debe ser eliminada por la selección, pues por definición es desfavorable (tendrá dificultades para pasar a las siguientes generaciones).

El concepto de especiación alopátrida (del griego *allos*: otro, y *patrís*: lugar de origen) resuelve parcialmente este problema. Dos poblaciones de una misma especie separadas por una barrera geográfica (como un mar o una montaña) seguirán caminos evolutivos separados. Cada una deberá adaptarse a su propio ambiente y en cada una surgirán sus propias mutaciones, sin que estas innovaciones evolutivas puedan compartirse; al estar los grupos aislados, no hay posibilidad material de que se crucen, o más técnicamente, no hay posibilidad de flujo genético entre poblaciones. Al cabo de un tiempo, estas poblaciones se habrán diferenciado tanto, que si vuelven a encontrarse los individuos de una y otra resultarán incompatibles: serán ya especies distintas. Según este concepto, la especiación constituye un subproducto de la adaptación divergente.

Por supuesto, no podremos conocer su cifra exacta hasta que no dispongamos del genoma completo de los chimpancés y podamos compararlo con el nuestro. Sin embargo, desde los años ochenta del pasado siglo y gracias a los estudios citológicos de Jorge J. Yunish y Om Prakash, a la sazón en la Universidad de Minnesota, sabemos que entre nuestros 22 autosomas (cromosomas no sexuales, es decir, todos excepto el X y el Y) y los de los chimpancés median, además de algunas reorganizaciones menores, 10 grandes reestructuraciones. Los cromosomas humanos 1, 4, 5, 9, 12, 15, 16, 17 y 18 presentan grandes fragmentos invertidos respecto a sus homólogos chimpancés; nuestro cromosoma 2 es el resultado de una fusión de dos cromosomas que persisten independientes en el resto de los grandes simios.

En repetidas ocasiones se han propuesto las reorganizaciones cromosómicas como buenas candidatas para erigirse en barreras genéticas. En los mamíferos y demás especies diploides, coexisten en las células de cada espécimen dos copias homólogas de cada cromosoma; una copia procede del padre y la otra, de la madre. Los individuos que heredaron de sus progenitores cromosomas con organizaciones distintas (heterocariotipos) son menos fértiles que quienes heredaron dos copias con la misma estructura, sea cual sea ésta (homocariotipos). Se debe ese fenómeno a que, en cada organismo, los pares de cromosomas homólogos se mezclan por recombinación antes de transmitirse, a su vez, a la generación siguiente.

El proceso de recombinación puede funcionar mal en heterocariotipos. Cuando en estos individuos "híbridos" se recombinan los cromosomas que presentan diferentes estructuras, puede darse todo tipo de anomalías, como la duplicación o la pérdida de partes sustanciales del genoma. Así pues, la descendencia de los heterocariotipos tiende a ser defectuosa y, por tanto, es castigada por la selección natural.

El modelo clásico sostiene que, si en una población hay cromosomas de dos tipos, éstos constituirán una barrera genética formidable que separará cada uno de los subgrupos de individuos homocigotos, permitiéndoles reproducirse entre ellos, pero aislándolos unos de otros. Las subpoblaciones aisladas, aun cohabitando en el mismo ecosistema, se convertirían al cabo del tiempo en especies distintas.

Con todo, este modelo está lastrado por una paradoja que, durante casi medio siglo, le ha restado crédito ante la mayoría de los investigadores. Si los heterocigotos son mucho menos fértiles que los homocigotos, ¿cómo podría una reorganización cromosómica establecerse en un número suficiente de individuos? La reorganización debe aparecer por mutación en un solo individuo; ahora bien, si, como es lógico, este individuo o su descen-

dencia tienen graves problemas de fertilidad, ¿cómo puede la reorganización aumentar su frecuencia en la población?

Por otra parte, siempre se puede argumentar que en algunos casos los problemas generados por la reorganización son leves. En esa situación, los heterocariotipos apenas se diferenciarán, en punto a su fertilidad, de los homocariotipos; la reorganización podrá entonces llegar a estar presente en un número elevado de individuos, pero, y eso es decisivo, no constituirá barrera genética alguna. Según parece, nos encontramos en un callejón sin salida.

En resumen, a la luz de los nuevos hallazgos paleontológicos, el modelo alopátrico de especiación no ofrecería una explicación satisfactoria de la separación de humanos y chimpancés. Pero tampoco arrojaría mayor luz su alternativa simpátrida. ¿Cómo librarse de esa aporía?

Resolución de la paradoja

La paradoja tiene solución. Incluso en los casos en que los problemas de fertilidad son menores, en los individuos heterocariotipos se da una gran reducción de la recombinación. En los cromosomas que han experimentado una reestructuración —y sólo en éstos— los individuos heterocariotipos presentan unas tasas mucho menores de recombinación que los individuos homocariotipos.

Un individuo homocigoto recombina (es decir, mezcla) todos y cada uno de sus cromosomas paternos y maternos antes de transmitirlos a sus descendientes (con la excepción parcial de los cromosomas sexuales, pero esto no nos atañe ahora). En cambio, en los individuos heterocariotipos la mezcla se ve enormemente reducida en los cromosomas reestructurados, limitándose prácticamente a los cromosomas que presentan la misma estructura (colineales).

En esta reducción de la recombinación se halla la clave de nuestro modelo. Si una reorganización no genera problemas de fertilidad, podrá aumentar su frecuencia hasta asentarse en un gran número de individuos. Dado que habrá poquísima recombinación entre cromosomas con estructuras distintas, podrá hablarse de la existencia de una barrera genética entre ellos. Cada una de las estructuras cromosómicas alternativas podrá coexistir en la población y todos los individuos tendrán descendencia fértil. Sin embargo, los cromosomas que presenten estructuras alternativas nunca se mezclarán. A efectos prácticos, estos cromosomas se hallarán tan distantes entre sí como si mediara un océano. Las innovaciones evolutivas que aparezcan y queden fijadas por la selección en un cromosoma con una estructura concreta casi nunca se compartirán con los cromosomas que muestren otra estructura. Se habrá detenido el flujo genético.

A partir de ese momento, los cambios genéticos que desembocan en la especiación pueden multiplicarse. En primera instancia, sólo los cromosomas que presenten estructuras alternativas podrán seguir caminos distintos, mientras que el resto continuará mezclándose normalmente por recombinación. Sin embargo, según vaya pasando el tiempo, cada una de las subpoblaciones acumulará sus propias características diferenciales, lo que, paulatinamente, irá también deteniendo el flujo genético en el resto de los cromosomas. La evolución divergente habrá terminado el trabajo que empezaron las reestructuraciones cromosómicas y tendremos ya

4. REPRESENTACION ESQUEMATICA de los cromosomas humanos 1, 2, 3 y 4 (*izquierda*) junto a sus homólogos chimpancés. Las bandas oscuras corresponden a la técnica citológica de tinción por bandas G, que facilita la identificación de los cromosomas bajo el microscopio. Los cromosomas 1 y 4 presentan una inversión (nótese el cambio de orden de las bandas). El cromosoma 2 es el resultado de una fusión. El cromosoma 3 es colineal.

ARCADI NAVARRO, TOMADO DE YUNIS Y PRAKASH, *SCIENCE*, 1982

distintas especies donde antes había una sola.

La posible huella genética de la especiación

¿Cómo saber si este modelo refleja una realidad de hace millones de años? ¿Cómo saber si es razonable suponer que las reorganizaciones cromosómicas participaron, o incluso iniciaron, el proceso de especiación que separó nuestro linaje del linaje de los chimpancés o si cumplieron alguna función en las sucesivas especiaciones? Podría haber una forma.

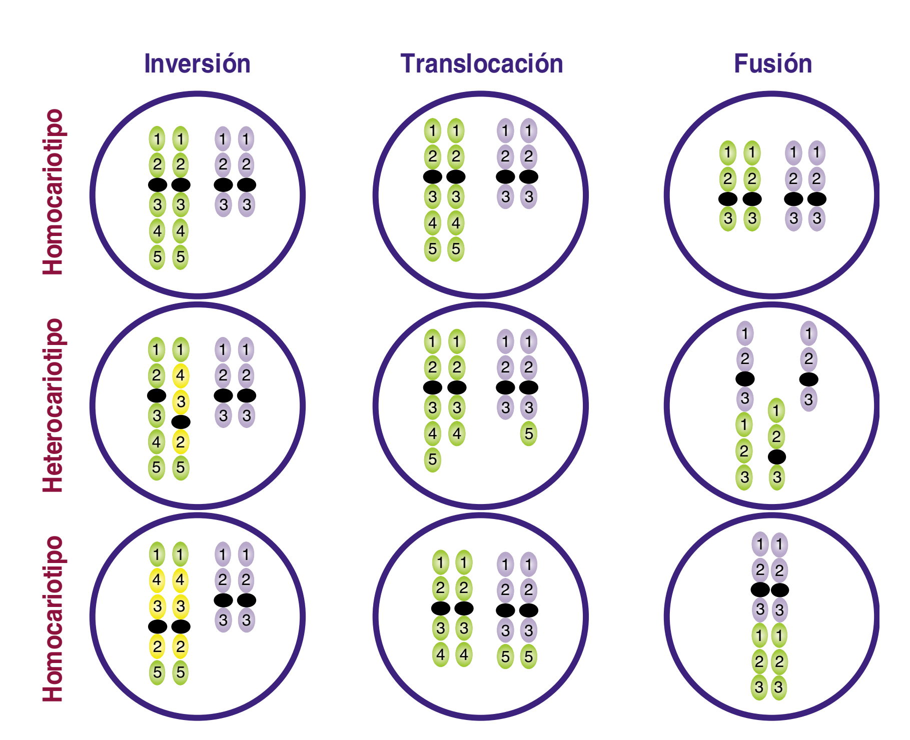
Las secuencias de los genomas de humanos y chimpancés divergen sólo en torno al 1 %-1,5 %. Más allá de mostrarnos lo mucho que puede llegar a ser un 1 %, a tenor del fenotipo, en esa cifra puede ocultarse la clave del misterio. Los cambios genéticos que nos separan de nuestros primos evolutivos distan de estar uniformemente distribuidos a lo largo del genoma; unas regiones divergen más que otras. Entre las causas de estos distintos grados de divergencia puede contarse la especiación cromosómica.

Si el período durante el cual los cromosomas reestructurados divergen genéticamente mientras los cromosomas colineales se mezclan con normalidad se prolonga lo suficiente, entonces los cromosomas reestructurados tenderán a presentar más diferencias que el resto. Esto es fácil de entender si imaginamos una nueva mutación neutra o beneficiosa que aparece en un cromosoma colineal y la comparamos con la misma mutación en un cromosoma reorganizado.

La mutación en el cromosoma colineal podrá incrementar su frecuencia hasta fijarse e instalarse en todos los cromosomas de todos los individuos de toda la especie. Por el contrario, la mutación aparecida en un cromosoma reestructurado no podrá transmitirse a los cromosomas que muestren una estructura diferente, porque, recordémoslo, no hay flujo genético entre ellos. Su presencia se ceñirá al tipo de cromosoma en que se originó. Alcanzada la plena especiación, esta mutación constituirá una diferencia genética entre especies. Visto de otro modo, podría decirse que los cromosomas reorganizados llevan más tiempo perteneciendo a especies distintas y que, por tanto, debería observarse en éstos una mayor divergencia genética.

Pensemos, además, que la acumulación de tales diferencias entre una subpoblación y otra promueve el proceso de especiación y acaba completándola. Las mutaciones favorables que adaptan cada especie a un medio distinto, y que pueden resultar incompatibles entre especies, se habrán ido acumulando de una manera diferenciada en los cromosomas reorganizados. Siendo esto así, puede predecirse una segunda observación: que la huella molecular de la selección positiva será más intensa en los cromosomas reorganizados.

La cuestión es, pues, doble. Se trata de averiguar si los cromosomas que presentan grandes reestructuraciones y que quizás han constituido barreras frente al intercambio genético entre humanos y chimpancés, han experimentado una mayor tasa de divergencia en sus secuencias. Asimismo, hay que comprobar si los genes alojados en estos cromosomas revelan un mayor número de sustituciones resultantes de una selección positiva.



ARCADI NAVARRO

5. EJEMPLOS ESQUEMATICOS de algunas reorganizaciones cromosómicas. La imagen muestra las estructuras de los cromosomas de homocariotipos y heterocariotipos para estas reorganizaciones.

Diferencias entre cromosomas reorganizados y colineales

La genómica comparada nos proporciona las herramientas adecuadas para abordar tales cuestiones. Para medir grados de divergencia entre los cromosomas de humanos y chimpancés, se recurre a un parámetro, el índice K, que designa el número de sustituciones nucleotídicas por cada 100 nucleótidos. Para determinar la divergencia en términos absolutos es mejor usar fragmentos de ADN estrictamente neutros: secuencias de nucleótidos que no contengan genes y que, por tanto, hayan podido evolucionar con independencia de factores relacionados con la selección.

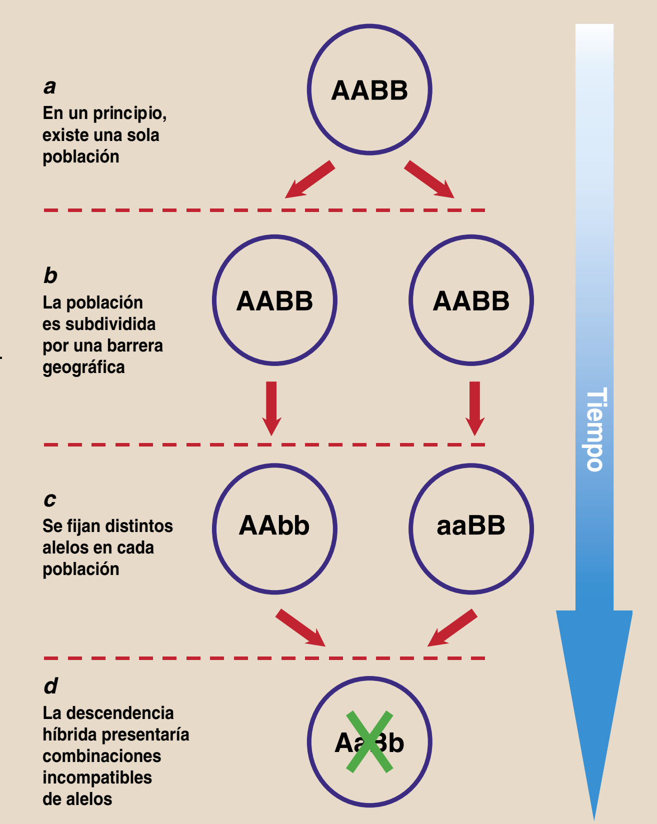
Un grupo de investigación de la Universidad de Chicago y otro de la Universidad de Leipzig nos proporcionaron sendas bases de datos sobre fragmentos de ADN neutros. Aunque estas bases de datos eran las más amplias de las que se disponía en ese momento, ninguna de ellas llegaba a representar el 1% del genoma y, por añadidura, no habían sido creadas con el objetivo de analizar diferencias entre cromosomas. Sin embargo, en ambos casos la tenden-

BASES GENETICAS DE LA ESPECIACION ALOPATRIDA

ERNST MAYR afirmó en los años sesenta del siglo pasado que la especiación alopátrida debía ser el modo más común de especiación. Este naturalista basaba su afirmación en un conocimiento detallado del mecanismo genético que puede dar lugar a la especiación alopátrida. El mecanismo en cuestión fue desentrañado, de forma independiente, por William Bateson, Theodosius Dobzhansky y Hermann Muller. ¿En qué consiste?

Imaginemos que una población de individuos diploides (portadores de dos copias de cada gen, una proveniente de su padre y otra de su madre; a las distintas versiones de un gen se les denomina "alelos"). Supongamos, por mor de simplificación, que estos individuos recibieron copias idénticas de sus progenitores para cada uno de sus genes (es decir, recibieron el mismo alelo de cada progenitor). Centrémonos en un par de estos genes, a y b. El genotipo de los individuos en estos dos genes se halla representado por AA y BB (dos alelos "A" en el gen a y dos alelos "B" en el gen b). Todos los individuos de esta población son idénticos (*véase la figura a*). Concedamos ahora que surge una barrera geográfica que divide a esta población en dos partes, llamémoslas este y oeste, aislándolas una de otra (*véase la figura b*). En un principio, ambas poblaciones son genéticamente idénticas. Al cabo de un tiempo, sin embargo, habrán aparecido por mutación nuevas versiones de estos genes. Algunas de estas mutaciones habrán aumentado de frecuencia, quizá por acción de la selección, hasta desplazar a las versiones antiguas (se habrán fijado). Como este proceso de mutación-selección-fijación es independiente en cada subpoblación y, dada la enormidad del genoma, resulta muy difícil que aparezcan y se fijen las mismas mutaciones más de una vez; lo más probable es que las poblaciones estén fijadas para versiones distintas de distintos genes (*véase la figura c*). En este caso, se ha fijado una nueva versión del gen b en la población este (llamémosle alelo "b") y una nueva versión del gen a ("a") en la población oeste. Los genotipos de estas poblaciones son ahora AAbb y aaBB.

La clave del proceso reside en los alelos "a" y "b", que nunca han operado juntos. Jamás han sido objeto de ensayo por la selección natural en el mismo individuo y es perfectamente posible su incompatibilidad (por ejemplo, porque uno sintetice un metabolito que el otro no puede procesar). Si individuos de ambas poblaciones volvieran a encontrarse y se cruzaran, el genotipo de su descendencia sería AaBb (*véase la figura d*) y, si "a" y "b" fueran incompatibles, estos individuos "híbridos" serían castigados por la selección natural. Cuanto más dilatado haya sido el tiempo de separación entre dos poblaciones, mayor será el número de diferencias fijadas entre ellas y más graves serán las consecuencias de la incompatibilidad genética. Llegará un momento en que constituirán especies distintas, genéticamente tan diferenciadas, que en muchos casos ni siquiera intentarán reproducirse entre sí. Este mecanismo, conocido desde hace casi cien años, es la base genética de la especiación alopátrida.



ARCADI NAVARRO

cia es la esperada, aunque la significación estadística sólo se alcanza en el primer caso.

En la primera base de datos los cromosomas reorganizados evidencian un 1,40 % de diferencias entre las secuencias de humanos y chimpancés, mientras que se registra sólo un 1,15 % de diferencias en los cromosomas colineales. En el segundo grupo de datos, las diferencias son de un 1,25 % en cromosomas reorganizados frente a un 1,23 % en colineales.

Por lo que se refiere a la acción de la selección positiva, hay una forma tradicional de detectarla en comparaciones entre especies: la tasa de evolución proteica, mensurable a través del cociente K_A/K_S. En las regiones de los genes que codifican para proteína puede haber dos tipos de mutación: cambios nucleotídicos que producirán cambios de aminoácidos, es decir, modificarán la secuencia de aminoácidos de la proteína, y cambios nucleotídicos sinónimos, que no repercutirán en la proteína, pues codifican para el mismo aminoácido.

Al comparar dos secuencias codificadoras, los cambios de aminoácido pueden medirse con el índice

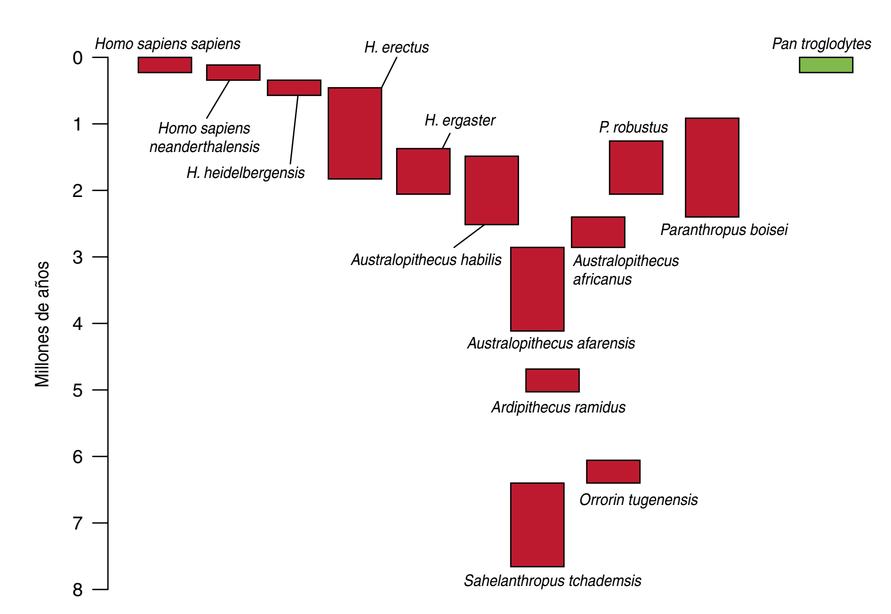
K_A, el número de cambios por cada 100 de las posiciones en las que una mutación puede modificar la secuencia de la proteína. Análogamente, los cambios sinónimos se miden mediante el índice K_S, el número de cambios por cada 100 posiciones sinónimas.

¿De qué modo nos indica el cociente K_A/K_S la acción de la selección? Un cambio de aminoácido constituye un tipo de mutación con potencial para modificar la función de la proteína. Por regla general, las modificaciones resultan perjudiciales; por eso, se eliminan a través de una selección natural de tipo purificador. Los cambios sinónimos, por el contrario, no introducen modificaciones funcionales en la proteína y pueden pasar inadvertidos para la selección. En general, pues, la acción de la selección purificadora hace que los cambios sinónimos sean mucho más abundantes que los cambios de aminoácido, lo que se traduce en un cociente K_A/K_S mucho menor que 1.

En el caso de que una región codificadora estuviera evolucionando de forma puramente neutra, es decir, sin la supervisión de la selección, esperaríamos el mismo porcentaje de unos cambios y otros, lo que, en promedio, arrojaría un cociente K_A/K_S igual a 1. Cuando en un gen el cociente K_A/K_S presenta valores mayores que 1, ese resultado suele atribuirse al fenómeno siguiente: un determinado número de cambios de aminoácido favorecidos selectivamente han elevado el índice K_A muy por encima de lo que es habitual. En resumen, la acción de la selección positiva deja a veces una huella molecular clara: cocientes K_A/K_S elevados, incluso mayores que 1.

La comparación de 115 genes repartidos entre los autosomas de humanos y chimpancés arrojó resultados sorprendentes. Medidas mediante el cociente K_A/K_S, las tasas de evolución proteica se cifraron en 0,84 en cromosomas reorganizados y en 0,37 en cromosomas colineales. Se trata de diferencias muy significativas, lo que indica que las tasas de divergencia proteica en unos cromosomas duplican de lejos las registradas en otros.

Y, sobre todo, al comparar la distribución por cromosomas de genes que presentan un cociente K_A/K_S mayor que 1, resultó que un 34 % de los genes en cromosomas reorganizados presentaban un cociente mayor que 1, mientras que sólo lo hacían un 11 % de los genes en cromosomas colineales.



6. SUMARIO DEL ARBOL GENEALOGICO de los humanos. La mayor parte de sus ramas se extinguieron antes de llegar a nuestros días. Se incluye también a los chimpancés, aunque apenas existen datos sobre sus ancestros.

ARCADI NAVARRO

El futuro

La prueba molecular parece indicar que nuestra hipótesis no anda desencaminada. Nuestros antepasados y los de los chimpancés no estuvieron separados, sino juntos, cruzándose incluso, mientras avanzaba su divergencia. Sin embargo, todavía es pronto para extraer conclusiones definitivas. De hecho, nosotros somos los primeros sorprendidos, y los mayores escépticos, ante el tamaño de las diferencias observadas en las tasas de evolución molecular. Por otra parte, estudios posteriores realizados por nosotros mismos y por otros grupos de investigación muestran un escenario mucho más complejo y apasionante de lo inicialmente esperado.

Los datos disponibles constituyen una parte minúscula del genoma. Cabe la posibilidad de que no sean una buena representación de éste. Otra posibilidad obvia es que no sólo estemos detectando la huella molecular de la especiación original entre el linaje humano y el de los chimpancés, sino también la huella acumulada de varias especiaciones simultáneas o de otras que se han ido sucediendo desde entonces o, incluso, de otras especiaciones anteriores.

Es muy probable que la historia evolutiva de humanos y chimpancés no haya sido lineal, apenas salpicada por unas pocas bifurcaciones, sino que esté formada por complejas ramificaciones. Cada especie ancestral puede haber dado origen no sólo a dos, sino a una multitud de linajes que habrían coexistido durante cierto tiempo, hasta que la extinción de la mayoría de ellos nos habría dejado como supervivientes a los humanos y los chimpancés.

No obstante tales reservas, son tan grandes las diferencias entre el hombre y el chimpancé, que dejan espacio para diversas interpretaciones. Por citar una: puesto que el genoma es una entidad altamente integrada, cabe la posibilidad de que las reorganizaciones cromosómicas, al cambiar la posición de ciertos genes, modifiquen algunas relaciones sutiles entre éstos y sus genes vecinos; las tasas de evolución proteica podrían aumentar para que los genes se adaptasen al nuevo contexto genómico inducido por su cambio de posición. Alternativas como ésta podrán empezar a abordarse cuando se haga público el genoma completo del chimpancé.

Además, si nuestros resultados se confirman, se abrirán las puertas a líneas de investigación inéditas. Pen-

BASES GENETICAS DE LA ESPECIACION SIMPATRIDA

UN MODO ALTERNATIVO DE ESPECIACION es la especiación simpátrida (del griego *sym:* con, y *patrís:* lugar de origen). Acontece ésta cuando distintos subgrupos de la misma especie, que comparten un mismo espacio y una misma ecología, se van diferenciando y dejando de reproducir entre ellos hasta que, andando el tiempo, ya no son capaces de hacerlo porque ya se han convertido en especies distintas. Hay varios motivos posibles de separación entre los subgrupos, que van desde la especialización en nichos ecológicos distintos hasta la selección sexual.

Entre todas las causas hipotéticas de especiación simpátrida, destaca la acción de las barreras genéticas: mutaciones que impiden el cruzamiento fértil entre los miembros de la población que las poseen y los que no. Algunos candidatos tradicionales a erigirse en barreras genéticas son las reorganizaciones cromosómicas. Sin embargo, la mayoría de los estudios sugerían que las barreras genéticas eran demasiado débiles para subdividir eficazmente a las poblaciones. Así pues, este modo de especiación se consideró meramente hipotético durante mucho tiempo porque —se suponía— la falta de aislamiento geográfico forzaría el intercambio continuo de genes, lo que uniformizaría las poblaciones y evitaría la especiación.

En los últimos años se han registrado avances teóricos y empíricos que han proporcionado bases suficientes para aceptar que la especiación simpátrida se da frecuentemente en la naturaleza. Algunos de estos avances teóricos se deben a Alexey Kondrashov, del norteamericano Centro Nacional de Información en Biotecnología, y al autor, por vías distintas. Así, hemos podido demostrar que, en ciertos casos, las bases genéticas de la especiación simpátrida y la alopátrida son equivalentes. Dentro de una misma población pueden surgir mutaciones incompatibles entre sí, que acaben subdividiéndola entre los individuos poseedores de unas mutaciones concretas y los portadores de otras. Estas mutaciones constituyen auténticas barreras genéticas. El apareamiento entre individuos de distintos grupos producirá descendientes que, por contener incompatibilidades en sus genomas, tenderán a ser eliminados por la selección, mientras que el apareamiento dentro de cada grupo resultará en individuos normales. Hemos tardado casi un siglo en darnos cuenta de que existe una base genética común en dos modelos de especiación que se habían considerado antagónicos.

semos en las bases genéticas de las características que nos hacen morfológica, etológica y cognitivamente distintos de nuestros parientes evolutivos vivos más próximos. Estas diferencias deben necesariamente estar codificadas en el 1 % o 1,5 % de cambios de secuencia existentes entre nosotros y los chimpancés. De entre estos cambios, es posible que algunos de los más importantes sean los que hayan desempeñado una función clave en la separación de nuestros linajes. Se podrían descubrir los genes que codifiquen las peculiaridades de cada especie: el estudio del contenido génico de los cambios cromosómicos que hayan estado implicados en la especiación.

También podríamos acceder a un tipo de información sobre el pasado, sólo permitida hasta ahora a la paleontología. Si conseguimos determinar qué reorganizaciones estuvieron implicadas en qué procesos de especiación y estudiamos su contenido, quizá podamos averiguar qué adaptaciones concretas guiaron esas especiaciones. Si conseguimos algún día tal proeza científica, estaremos valiéndonos del hecho de que algunos de los linajes que se separaron del nuestro (y que, probablemente, nuestros ancestros contribuyeron a extinguir) nos habrían dejado algo más que huesos o herramientas. Secretamente codificado en nuestro genoma, todos y cada uno de nosotros habría heredado fragmentos de un relato sobre la historia de esos seres. Estaría en nuestras manos la posibilidad de descifrar ese mensaje y, de forma hasta ahora inimaginable, seguir avanzando en la comprensión de quiénes somos y de cómo hemos llegado hasta aquí.

El autor

Arcadi Navarro ha desarrollado la investigación que recoge este artículo en la Unidad de Biología Evolutiva de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona. Navarro es un biólogo teórico que se doctoró en la Universidad Autónoma de Barcelona y trabajó durante varios años en la Universidad de Edimburgo. Actualmente pertenece al programa Ramón y Cajal.

Bibliografía complementaria

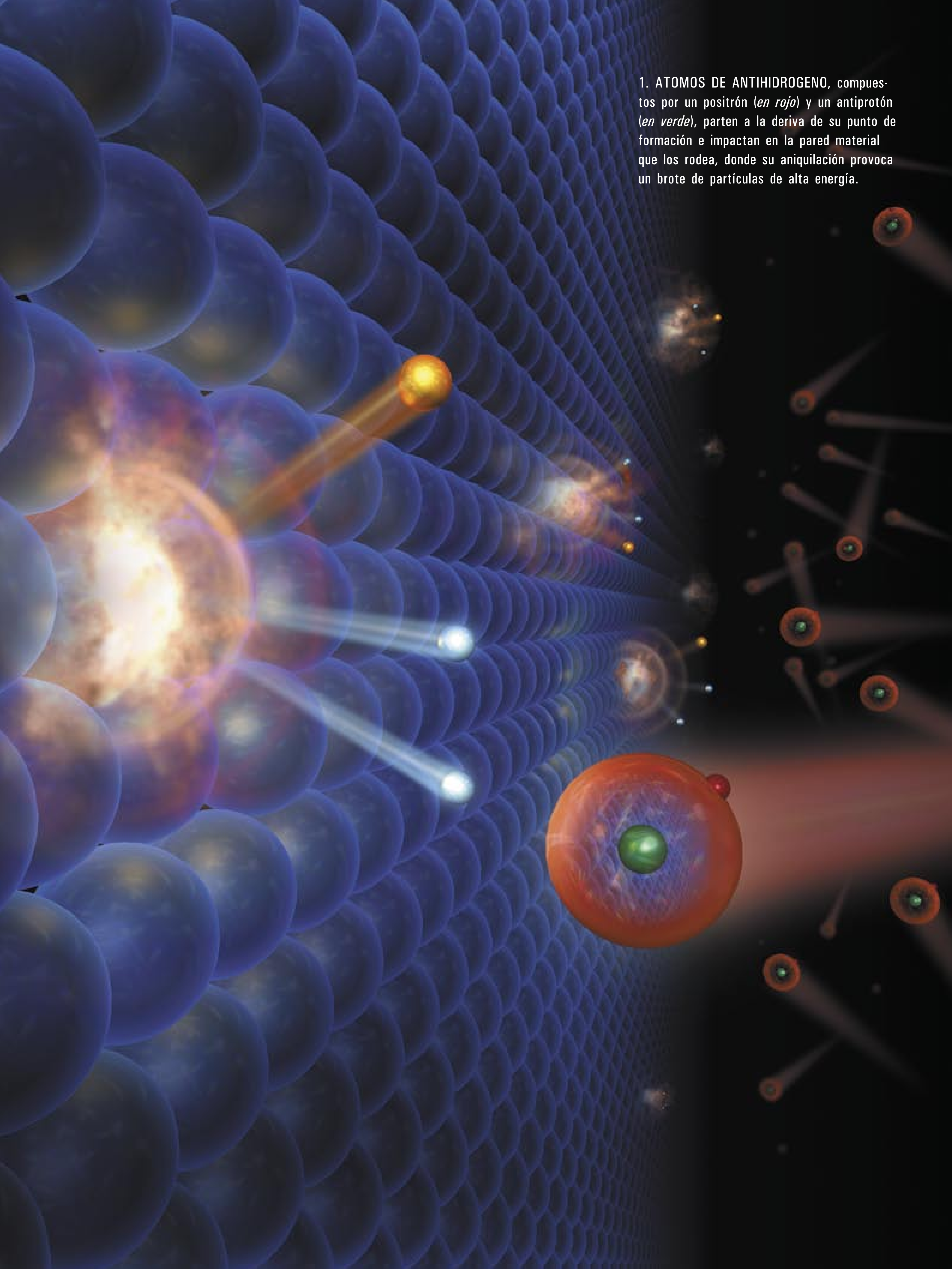
GENOMIC DIVERGENCES BETWEEN HUMANS AND OTHER HOMINOIDS AND THE EFFECTIVE POPULATION SIZE OF THE COMMON ANCESTOR OF HUMANS AND CHIMPANZEES. F. C. Chen y W. H. Li en *American Journal of Human Genetics*, n.º 68, págs. 444-456; 2001.

CHROMOSOMAL REARRANGEMENTS AND SPECIATION. L. H. Rieseberg en *Trends in Ecol & Evol.*, n.º 16, págs. 351-358; 2001.

GENOMEWIDE COMPARISON OF DNA SEQUENCES BETWEEN HUMANS AND CHIMPANZEES. I. Ebersberger, D. Metzler, C. Schwarz y S. Paabo en *American Journal of Human Genetics*, n.º 70, págs. 1490-1497; 2002.

ACCUMULATING POSTZYGOTIC ISOLATION GENES IN PARAPATRY: A NEW TWIST ON CHROMOSOMAL SPECIATION. A. Navarro y N. H. Barton en *Evolution*, n.º 57, págs. 447-459; 2003.

CHROMOSOMAL SPECIATION AND MOLECULAR DIVERGENCE-ACCELERATED EVOLUTION IN REARRANGED CHROMOSOMES. N. H. Barton y A. Navarro en *Science*, vol. 300, págs. 321-324; 2003.



1. ATOMOS DE ANTIHIDROGENO, compuestos por un positrón (*en rojo*) y un antiprotón (*en verde*), parten a la deriva de su punto de formación e impactan en la pared material que los rodea, donde su aniquilación provoca un brote de partículas de alta energía.

Creación de antimateria fría

Con átomos poco energéticos de antihidrógeno se contrastaría una propiedad fundamental del universo

Graham P. Collins

Las diferentes partículas de antimateria comparten todas las propiedades de sus antónimas, a excepción de la carga eléctrica, que es de signo contrario. Cuando llegan a encontrarse con sus opuestas, se destruyen mutuamente con gran violencia. Si un solo gramo de partículas de antimateria chocara con un gramo de sus gemelas de materia normal se liberaría tanta energía como en la detonación de 40.000 toneladas de TNT; bastaría para surtir de energía a casi 5000 hogares durante todo un año.

Por fortuna para nuestra seguridad personal, y por desdicha para la política energética, la antimateria escasea mucho en el mundo natural. Ciertas sustancias radiactivas emiten positrones, antipartículas de los electrones empleadas en la tomografía por emisión de positrones (TEP). Desde el espacio nos llega sin cesar un pequeño número de antiprotones entremezclados con los rayos cósmicos. Y cuando una partícula muy energética de radiación cósmica choca con un átomo de la atmósfera, el chaparrón de partículas que se produce contiene numerosas antipartículas.

Pero si quisiéramos verdaderos pedazos de antimateria, no tendríamos la menor posibilidad de encontrarlos. Que se sepa, ni siquiera existen en la naturaleza átomos de antimateria. No obstante, la teoría mueve a pensar que gracias al estudio de los antiátomos se conocerían mejor ciertos fundamentos de la física. En consecuencia, se quiere fabricarlos. A lo largo de estos últimos años ha habido algunos buenos resultados.

Se vienen creando haces de antiprotones desde 1955. Se consiguió por vez primera en el acelerador Bevatrón del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, estrellando protones contra una diana de cobre. Este proceso es el recíproco de la aniquilación: una parte de la energía pura de las colisiones se convierte en pares de protones y antiprotones. En nuestros días, el Laboratorio Nacional Fermi en Batavia, estrella antiprotones que circulan por anillos enormes contra haces similares de protones; así se estudia la física de partículas a energías muy grandes.

Los primeros antiátomos que jamás hayan existido se produjeron en el CERN, cerca de Ginebra, en 1995. Un haz de antiprotones circulantes en un anillo de almacenamiento atravesó un chorro de átomos de xenón. En ocasiones, una colisión producía un par electrón-positrón de modo tal que el positrón y el antiprotón continuaban juntos su vuelo y constituían un átomo de antihidrógeno. El equipo observó nueve antiátomos; se movían casi a la velocidad de la luz. En 1998 un experimento parecido creó en el Fermilab 57 antiátomos.

Pero estos antiátomos de altísima velocidad apenas sirven. Para estudiar detenidamente las propiedades de los antiátomos debemos mantenerlos en una trampa atómica, es decir, hay que frenarlos y enfriarlos a menos de 0,5 kelvin. Dos grupos del CERN persiguen esta meta. El grupo ATRAP, dirigido por Gerald Gabrielse, de la Universidad de Harvard, surgió de un grupo anterior (TRAP) que dio los primeros pasos en la captura y enfriamiento de antiprotones [*véase* “Antiprotones extremadamente fríos”, por Gerald Gabrielse; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1993]. ATHENA, dirigido por Rolf Landua, del CERN, aunque entró en la carrera mucho más tarde, fue el primero en anunciar, en 2002, la detección de átomos fríos de antihidrógeno. Otro equipo, ASACUSA, estudia unos exóticos átomos de helio en los que un antiprotón reemplaza a un electrón.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Aunque hay quienes esperan que la antimateria propulse vehículos espaciales (*véase el recuadro* "Propulsión por antimateria"), la investigación de las antipartículas tiene como meta inmediata la comprobación de la validez de la simetría CPT, que establece la relación entre las propiedades de cada especie de partículas y las de sus antipartículas. La teoría pronostica que partículas y antipartículas habrían de obedecer a las mismas leyes físicas. Con un número suficiente de antiátomos atrapados, se pretende observar si el antihidrógeno emite y absorbe luz exactamente a las mismas frecuencias que el hidrógeno. En caso de que se respete la simetría CPT, los espectros de uno y otro coincidirán.

Cada simetría que compone la simetría CPT se infringe en el mundo real. Cada vez que se ha desmentido una predicción de simetría, los físicos han dado un paso adelante en el conocimiento de las propiedades y fuerzas de las partículas fundamentales. Si el antihidrógeno transgrediese la simetría CPT, la física sufriría una gran conmoción.

Para comprender con mayor precisión en qué consiste la simetría CPT y la razón de su importancia primerísima, escindámosla en los componentes individuales que las tres letras denotan: inversión de carga, inversión de paridad e inversión de tiempo. La inversión de carga consiste en sustituir las partículas por antipartículas. La inversión de paridad viene a ser como la reflexión especular (más exactamente, es la inversión del espacio respecto a un punto). Y la inversión del tiempo consiste en la reproducción retrógrada de la "película" de la realidad.

Afirmar que la simetría P es válida, o que la naturaleza es "invariante frente a la simetría P", significa que cualquier proceso físico observado por reflexión especular ha de seguir obedeciendo las mismas leyes que el proceso sin reflejar. La simetría P nos parecerá intuitivamente obvia si nos imaginamos lanzando al aire una pelota frente a un espejo. ¿Cómo podría no cumplirse P en cualquier proceso? Sorprendentemente, como se descubrió en 1956, la interacción nuclear débil, que interviene en ciertas desintegraciones radiactivas, infringe P. El cobalto 60 se desintegra de manera diferente en el espejo. La desintegración del cobalto 60 tiene una "quiralidad" —una discriminación entre "a derechas" o "a izquierdas"— intrínseca que el espejo invierte.

Resumen/Los primeros antiátomos

- Las antipartículas tienen carga de signo contrario al de sus partículas correspondientes. Si una partícula y una antipartícula entran en colisión, se destruyen con liberación de una cantidad enorme de energía. Hace poco, se han creado los primeros átomos de antimateria (antiátomos) de movimiento lento.
- Estos antiátomos de antihidrógeno podrían servir en el futuro para verificar una propiedad fundamental del universo, la CPT. Una infracción de la simetría CPT, por minúscula que fuera, constituiría un descubrimiento profundo y abriría la posibilidad de una física nueva.
- Hasta la fecha, sin embargo, los átomos de antihidrógeno parecen tener una temperatura de unos 2400 K, mucho más elevada que los 0,5 K requeridos para atraparlos y estudiar con ellos la CPT. El objetivo siguiente será producir antiátomos a temperaturas menores todavía y se hallen en estados adecuados para estudios espectroscópicos.



2. EL APARATO ATHENA DEL CERN, cerca de Ginebra, una de las dos instalaciones que han estado produciendo antihidrógeno frío.

En muchas situaciones donde se rompe la simetría P, todavía se conserva la simetría CP. Es decir, la imagen especular de un átomo de anticobalto se comporta de forma idéntica a la de un átomo real de cobalto. Es como si la antipersona fuera zurda, por lo que su reflejo es diestro, lo mismo que la persona sin reflejar.

Desde 1964 se sabe que ciertos procesos vulneran en ocasiones la simetría CP. A pesar de su carácter excepcional, la ruptura de la simetría CP podría desempeñar un papel en la explicación de que en el universo predomine la materia sobre la antimateria (*véase el recuadro* "Asimetría de la materia en el universo").

Lo cual nos deja a CPT como única simetría que pueda ser exacta: una película proyectada sobre un espejo protagonizada por antipartículas que retroceden en el tiempo. La invariancia de CPT entraña que esta antipelícula especular que avanza "marcha atrás" se atendría exactamente a las mismas leyes físicas que la realidad (no se podría distinguir de una película de partículas que progresase en el tiempo). Si el comportamiento de la antipelícula invertida discrepase en algún aspecto de la realidad, tal diferencia constituiría una "violación" de la simetría CPT.

La simetría CPT tiene una profunda cimentación matemática. Está firmemente enraizada en las ecuaciones de la teoría cuántica de campos que describen las fuerzas y las partículas fundamentales. La física de partículas se fundamenta en la teoría cuántica de campos; la violación de la CPT señalaría los límites de ésta. Un resultado así marcaría el camino hacia una teoría física que superase el modelo estándar de la física de partículas.

De experimentos con partículas inestables se ha inferido que cualquier posible violación de la simetría CPT tendría que ser muy pequeña. Además, cuando el grupo TRAP efectuó experimentos que compararon antiprotones atrapados y protones ordinarios, se comprobó, con mayor precisión que nunca, que la simetría CPT se cumplía

para estas clases de partículas. Pero la búsqueda ha de continuar con un grado de exactitud mucho mayor, pues hay razones para esperar que la violación de CPT acontezca a una escala todavía menor [*véase* “Búsqueda de violaciones de la relatividad”, por Alan Kostelecký; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2004]. La espectroscopía del hidrógeno es muy precisa. Si se lograse la misma precisión con el antihidrógeno, la comparación de ambos espectros llevaría a la física mucho más allá de su actual frontera.

La antimateria no sólo podría infringir en ocasiones la simetría CPT; la gravedad quizá la afecte de distinta forma que a la materia ordinaria. No se trata de que la antimateria experimente “antigravedad” y sea repelida por la materia, sino de que algún diminuto componente de la gravedad quede invertido para la antimateria. Un tal descubrimiento entrañaría una profunda revisión de nuestra concepción de la gravedad. No hay posibilidad de examinar los efectos de la gravedad con partículas dotadas de carga, como los positrones y los antiprotones; las perturbaciones provocadas por los campos eléctricos o magnéticos serían demasiado grandes. Resulta concebible, empero, la observación de la caída libre de antiátomos neutros enfriados hasta temperaturas bajísimas, como se ha hecho con átomos ordinarios enfriados mediante láser. No obstante, los experimentos gravitatorios tendrían una dificultad técnica varios órdenes de magnitud mayor que los experimentos de CPT.

Anticomponentes

La obtención de los átomos de antihidrógeno necesarios para estos experimentos requiere dos ingredientes —positrones y antiprotones— cuya manufactura supone grados de dificultad muy diferentes. Cuesta mucho menos conseguir los positrones: hay numerosos isótopos radiactivos que los emiten en sus desintegraciones beta. Carecemos, en cambio, de fuentes naturales prácticas de antiprotones.

En los experimentos del CERN, el isótopo sodio 22 es la fuente de positrones. Una masa de 1 gramo de sodio 22 emite 200 billones de positrones por segundo. Pero se emiten con una energía de 0,55 MeV (550.000 electronvolt), equivalentes a una temperatura de 6000 millones de grados. Para utilizarlos en la preparación de antihidrógeno es necesario frenarlos desde la velocidad con que salen, casi nueve décimas partes de la velocidad de la luz, hasta unos pocos kilómetros por segundo. Este frenado se consigue a través de distintos procesos (*véase el recuadro* “Creación y detección de antihidrógeno frío”). En el transcurso de cinco minutos, el grupo ATHENA obtiene unos 75 millones de positrones suspendidos entre campos magnéticos y eléctricos en una cámara de alto vacío, la trampa de Penning (en recuerdo de Frans Michel Penning, que la ideó en 1936). ATRAP, en cambio, captura unos 5 millones de positrones. Las trampas encierran a los positrones de forma muy segura: al cabo de una hora sólo se ha perdido un número insignificante.

Dado que ninguna fuente radiactiva útil produce antiprotones, deben crearse a partir de energía pura. Se consigue disparando protones contra una diana metálica. Se generan, así, entre otras partículas, antiprotones de alta energía. Para preparar antihidrógeno, hay que frenar esos antiprotones hasta una temperatura similar a la de los positrones. Las técnicas utilizadas para acelerar los haces de partículas se aplican en sentido inverso, para acometer la primera parte del proceso de deceleración. Desde 2000, se efectúa este procedimiento en el “desacelerador de antiprotones” del CERN.

El desacelerador emite un impulso de unos 20 millones de antiprotones cada minuto y medio. Viajan a una décima parte de la velocidad de la luz, equivalente a una energía de unos 5 MeV. Una delgada ventana de aluminio los frena; su energía se reduce, por fin, a unos electronvolt en una trampa de Penning, a la que se añaden sucesivos haces de antiprotones procedentes del desacelerador de antiprotones mediante un proceso de apilamiento inventado por TRAP. La trampa de ATHENA conserva sus 10.000 antiprotones durante horas; ATRAP, merced a un vacío más perfecto, ha guardado medio millón durante dos meses sin pérdidas mensurables.

Trampas encajadas

La idea de crear trampas para las partículas dotadas de carga cuenta con una historia de decenios. Ahora bien, las trampas estándar valen sólo para partículas que tengan carga eléctrica del mismo signo (la misma “polaridad”). Una trampa de Penning cilíndrica que guarda positrones no servirá para encerrar antiprotones, ya que recurre al campo magnético para que las partículas no escapen en sentido radial y al campo eléctrico para elevar el potencial en cada extremo del cilindro.

Asimetría de la materia en el universo

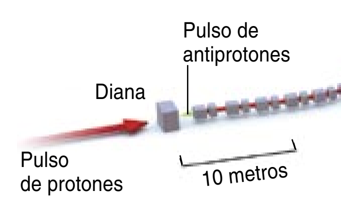
Cuando el universo dio comienzo en la gran explosión, la energía liberada debió producir iguales cantidades de materia y de antimateria. ¿Cómo pudo evolucionar el universo hasta el estado que observamos hoy, donde casi no hay más que materia? Andrei Sajarov estableció en 1967 una serie de condiciones necesarias; entre ellas, un fenómeno, la “violación de CP”, que permite que las partículas se desintegren con diferente rapidez que las antipartículas.

Dos experimentos actualmente en curso —BaBar, en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), y Belle, en Tsukuba, en Japón— están estudiando la violación de CP en la desintegración de unas partículas y antipartículas llamadas mesones B. Ambos grupos anunciaron en agosto de 2004 la observación directa de una gran cantidad de violación CP en esas partículas: un determinado tipo de desintegración ocurría con frecuencia mucho mayor en las partículas que en las antipartículas.

Las cantidades de violación CP observadas hasta la fecha concuerdan en casi todos los casos con las previstas por el modelo estándar de la física de partículas. Existe, sin embargo, una reacción concreta que presenta un ligero exceso de violación CP. De confirmarse, señalaría el advenimiento de una física en la que intervendrían partículas todavía no descubiertas. La cantidad de infracción observada hasta la fecha no parece suficiente para que el modelo de Sajarov explique la asimetría materia-antimateria de nuestro universo.

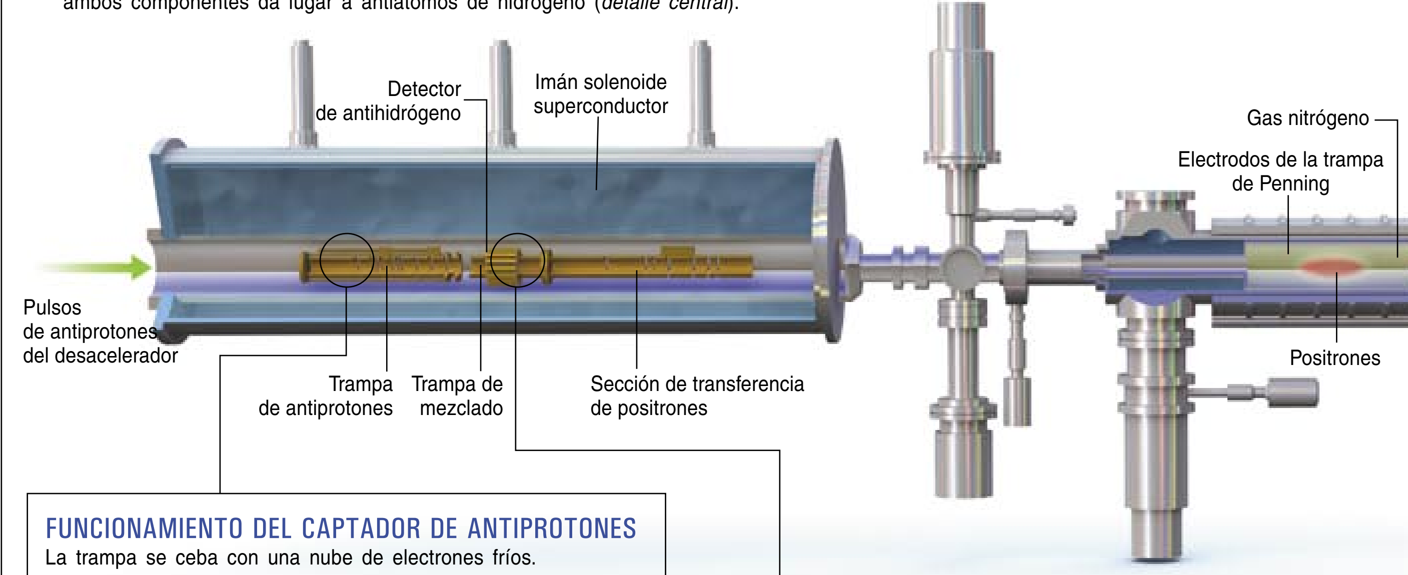
CREACION Y DETECCION DE ANTIHIDROGENO FRIO

Para crear átomos de antihidrógeno es necesario producir primero y reunir luego positrones y antiprotones. El desacelerador de antiprotones del CERN (*a la derecha*) suministra antiprotones de energía bastante baja a tres experimentos: ATRAP, ATHENA y ASACUSA. Esos positrones y antiprotones se atrapan mediante trampas magnéticas y eléctricas en cada extremo de un aparato de forma tubular donde se ha hecho el vacío (*abajo*). Los campos se manipulan a continuación con el fin de reunir las partículas en una trampa de mezclado, donde se forman átomos de antihidrógeno, que se detectarán. Los principios de funcionamiento de la trampa de mezclado se debieron al grupo ATRAP y a su predecesor, TRAP. Los diagramas ofrecidos se refieren al aparato ATHENA.



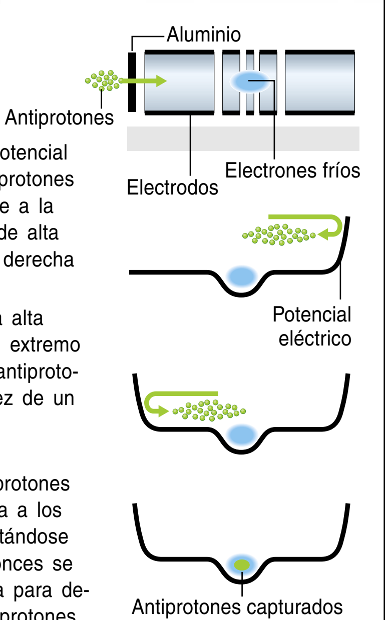
EL CAPTADOR DE ANTIPROTONES Y LA TRAMPA MEZCLADORA

El captador de antiprotones (*a la izquierda*) recoge pulsos de antiprotones procedentes del desacelerador (*detalle a la izquierda*). Cuando se han acumulado suficientes antiprotones, se los transfiere a la trampa de mezclado, que alberga también los positrones suministrados por el acumulador de positrones que se ve a la derecha; la mezcla de ambos componentes da lugar a antiátomos de hidrógeno (*detalle central*).



FUNCIONAMIENTO DEL CAPTADOR DE ANTIPROTONES

La trampa se ceba con una nube de electrones fríos. Los antiprotones procedentes del desacelerador penetran a través de una delgada pared de aluminio.



El aluminio frena algunos de los antiprotones

Una elevada barrera de potencial eléctrico refleja estos antiprotones ralentizados y los devuelve a la trampa. Los antiprotones de alta energía escapan hacia la derecha

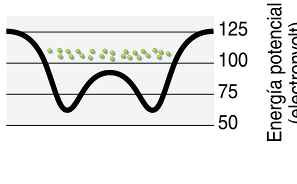
Se eleva rápidamente una alta barrera de potencial en el extremo izquierdo, por lo que los antiprotones rebotan una y otra vez de un extremo a otro

En cada pasada, los antiprotones ceden parte de su energía a los electrones y acaban asentándose en la trampa central. Entonces se rebaja la barrera izquierda para dejar pasar otro lote de antiprotones

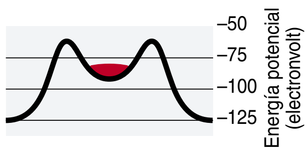
FUNCIONAMIENTO DE LAS TRAMPAS ENCAJADAS DE MEZCLADO

Los positrones no se pueden recoger en el mismo pozo de potencial donde se acumula una nube de antiprotones, por lo que su trampa ha de encajarse dentro de la trampa de antiprotones.

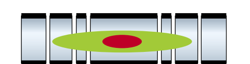
Los antiprotones rebotan hacia adelante y atrás en los confines de un pozo de potencial grande y profundo, en cuyo centro se alza un montículo



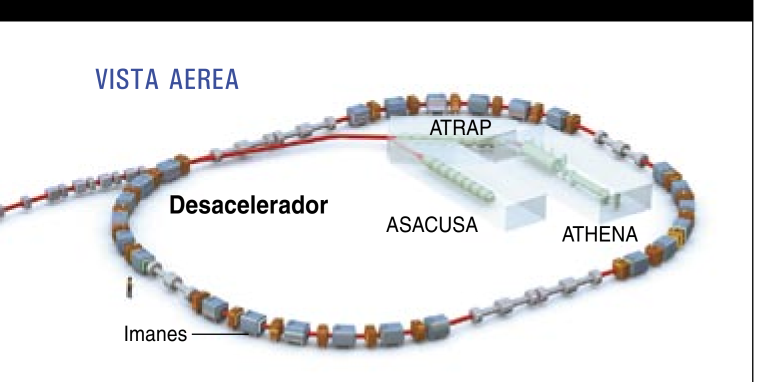
Los positrones, por tener carga de signo contrario, "ven" invertido el potencial: para ellos, el montículo es una depresión ubicada en la cima de un monte ancho



La depresión atrapa a los positrones en la misma región del espacio que a los antiprotones, lo que permite la formación de átomos de antihidrógeno

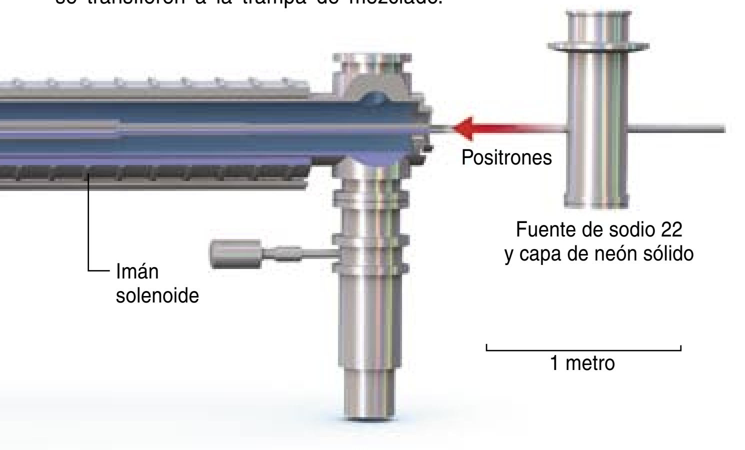


VISTA AEREA



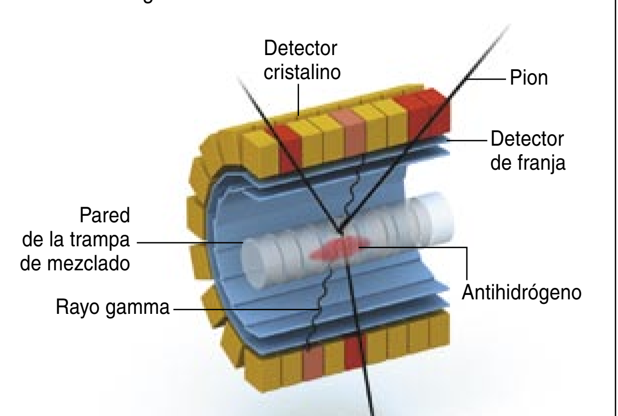
ACUMULADOR DE POSITRONES

Una fina película de neón sólido, primero, y las colisiones con el nitrógeno gaseoso, después, frenan los positrones emitidos por una fuente de sodio 22 (*derecha*). Una trampa de Penning captura los positrones frenados. Cuando se han acumulado suficientes positrones, se elimina el nitrógeno por bombeo y los positrones se transfieren a la trampa de mezclado.



FUNCIONAMIENTO DEL DETECTOR

Los átomos de antihidrógeno que se forman en la trampa de mezclado, al ser eléctricamente neutros, se salen de la trampa e impactan en las paredes del recipiente. El antiprotón y el positrón quedan aniquilados allí; se producen piones de alta energía y un par de rayos gamma. Las capas de detectores de partículas que rodean la región de mezclado detectan estas emisiones.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Cabe imaginar el potencial de cada extremo como una rampa y el positrón como una bola lanzada rampa arriba. Los positrones que se muevan con lentitud suficiente llegarán a detenerse, caerán rampa abajo y seguirán dentro de la trampa. Los antiprotones, de polaridad contraria, no verían en los extremos del cilindro rampas ascendentes, sino rampas cuesta abajo; por ellas descenderían hasta estrellarse contra las paredes materiales que contienen el vacío de la trampa, perdiéndose. Para atrapar los antiprotones habría que invertir el campo eléctrico, y por lo tanto el potencial.

Gabrielse y sus colaboradores idearon en 1988 la manera de atrapar a la vez especies de polaridad opuesta: se pone una trampa somera para las partículas de una polaridad en el seno de otra trampa, más profunda, para partículas de la polaridad opuesta. La especie atrapada por las paredes exteriores ve un pozo profundo con un montículo elevado en el centro (imaginemos el fondo de una botella de vino). Recíprocamente, la otra especie de partículas ve todos los potenciales invertidos: el montículo se torna una depresión en la cima, que las retiene. ATRAP y ATHENA se valen de estas trampas encajadas para mantener juntos sus positrones y antiprotones; ambas partículas coexisten en la región del montículo. El equipo de Gabrielse demostró la viabilidad de este sistema en 1996 con protones y electrones, y en 2001 con positrones y antiprotones.

Las colisiones entre las partículas conjuntamente atrapadas determinan que, en ocasiones, un positrón y un antiprotón sigan una misma trayectoria. El par de partículas no tardará en girar una alrededor de la otra: habrán constituido un átomo de antihidrógeno.

Detección

Una vez creados los átomos de antihidrógeno, han de abordarse dos problemas: el primero, la demostración de que esos átomos se encuentran de verdad ahí; el segundo, la rapidez con que ha de hacerse la detección, pues los átomos de antihidrógeno, al ser eléctricamente neutros, no quedan encerrados en ninguna de las dos trampas electromagnéticas encajadas. Los átomos, a la deriva, escapan de la trampa, a la velocidad que tuviesen cuando se los creó.

ATHENA se apoya en el segundo problema para resolver el primero. Cuando los átomos en fuga tropiezan contra las paredes materiales del recipiente, se detienen. Casi inmediatamente, el positrón queda aniquilado al encontrarse con un electrón de alguno de los átomos de la pared, mientras un núcleo destruye el antiprotón. La primera reacción genera dos rayos gamma de una energía característica, 511 keV, que se propagan en direcciones opuestas; la segunda crea dos o tres partículas, llamadas mesones pi o piones. No resulta demasiado difícil detectar todas estas partículas. Cada vez que los detectores observan que en un mismo punto de la pared, en el mismo instante, se originan rayos gamma de esa energía y piones, se sabe que se ha destruido un átomo de antihidrógeno y, por lo tanto, que había sido creado.

Pero no es tan sencillo. Algunas aniquilaciones de antiprotones producen una lluvia de positrones, que a su vez generan rayos gamma de 511 keV; de ellos, dos se pueden detectar. Los antiprotones solitarios pueden así remedar

la señal del antihidrógeno. Es necesario, pues, determinar la proporción de falsos positivos en los datos.

El grupo ATRAP se vale de una técnica muy distinta, que elimina el ruido de fondo. Sólo cuenta los átomos de antihidrógeno que por azar viajan a lo largo del eje de la trampa cilíndrica y que, también por azar, se encuentren débilmente ligados (los que viajen por otras direcciones o se encuentren en estados de ligadura más intensa no se detectan). Los antiátomos, neutros, atraviesan sin esfuerzo una barrera de potencial muy alto, que bloquea los antiprotones no integrados en un antiátomo. A continuación, los antiátomos entran en un campo eléctrico muy intenso, que arrancará a los que estén débilmente ligados su positrón y antiprotón. Por último, otra trampa electromagnética retiene los correspondientes antiprotones recién desnudados. Tras un período de recolección, se libera a los antiprotones y, al aniquilarse en las paredes cercanas, se los detecta.

Cuando en la trampa encajada no hay positrones, no se detectan antiprotones, lo que demuestra que los antiprotones solitarios no pueden remontar la barrera de potencial y llegar a la trampa más alejada. El recuento que se obtiene cuando sí hay positrones presentes es, pues, el recuento de los átomos neutros de antihidrógeno que casualmente estaban débilmente ligados y se desplazaban en la dirección correcta. No hay que deducir ruido de fondo alguno.

Mediante una ingeniosa modificación, que añade un campo eléctrico oscilante, ATRAP logró en 2004 reunir información sobre la velocidad con que se movían sus átomos de antihidrógeno. Dicho con otras palabras: sobre su temperatura. El resultado fue un tanto descorazonador: era de 2400 K, muy superior a los 4,2 K de los componentes de la trampa, refrigerados con helio líquido. Para un estudio espectroscópico preciso de los antiátomos, tendría que hallarse muy por debajo de 0,5 K; si no fuera así, resultaría imposible encerrarlos en una trampa de átomos neutros y examinar su absorción de haces de láser de diversas frecuencias.

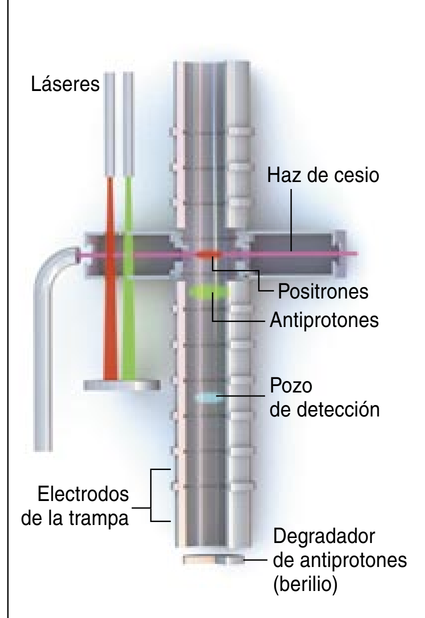
Producción controlada por láser

Con el fin de crear antiátomos de menor temperatura, ATRAP ha desarrollado un sistema de producción de antihidrógeno controlado por láser que prescinde de las trampas encajadas. Los positrones y los antiprotones se conservan en pozos de potencial contiguos, aunque separados (*véase el recuadro* “Producción controlada por láser”). Los positrones se llevan hacia los antiprotones mediante una cadena de reacciones que empieza en un haz de átomos de cesio excitados por láser. La cadena de reacciones está concebida para que se transfiera muy poca energía al antiátomo que se forma.

El grupo ATRAP llevó a cabo este experimento en pocas horas, a punto de expirar la sesión experimental de 2004, por lo que no tuvo tiempo de optimizar el método, ni de recoger una cantidad apreciable de antiátomos. Sólo detectaron trece. Gabrielse cree que son mucho más fríos que los producidos en las trampas de Penning encajadas.

PRODUCCION CONTROLADA POR LASER

La colaboración ATRAP ha introducido un método para la producción de antiátomos de hidrógeno, controlada por láser, que no requiere trampas encajadas (*el dispositivo, a la izquierda; el proceso, a la derecha*). En este caso, los positrones y los antiprotones se conservan en trampas contiguas; “átomos” de positronio, neutros, formados por un electrón y un positrón que orbitan uno en torno al otro, se encargan de transferir los positrones a los antiprotones. La secuencia de reacciones debería garantizar que los átomos de antihidrógeno resultantes viajen a poca velocidad (es decir, baja temperatura), pero no se ha confirmado todavía.

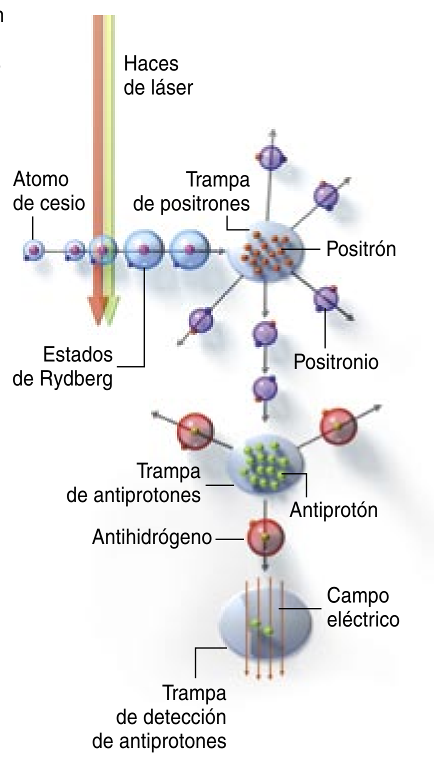


1 Atomos de cesio procedentes de un horno atraviesan haces de láser sintonizados para excitar los átomos hasta estados de Rydberg, en los que el átomo ocupa un gran volumen.

2 Los positrones de una trampa capturan los electrones excitados de los átomos de cesio y forman positronio, también en estados de Rydberg. Los positronios, por ser eléctricamente neutros, escapan de la trampa en todas las direcciones.

3 Algunos positronios viajan hasta una trampa de antiprotones, donde éstos recogen los positrones y forman así átomos de antihidrógeno, que escapan de la trampa en todas las direcciones.

4 Algunos de los átomos de antihidrógeno viajan hasta una segunda trampa de antiprotones, donde un campo eléctrico intenso les arranca los positrones. Los antiprotones ahora atrapados se detectan, lo que constituye una demostración de la formación de átomos de antihidrógeno.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

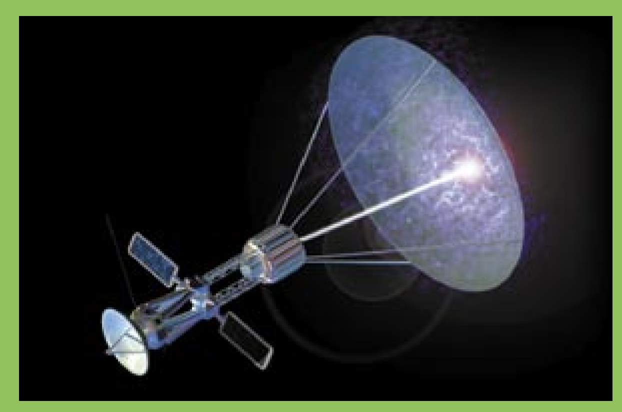
Propulsión por antimateria

Según la NASA, 42 miligramos de antiprotones poseen la misma energía que los 750.000 kilogramos de combustible y comburente almacenados en el tanque externo de una lanzadera espacial. Salta a la vista cuán útil sería una fuente de energía tan concentrada para la propulsión.

El primer problema consiste en hallar un procedimiento práctico para producir miligramos de antimateria. El desacelerador de antiprotones del CERN crea 20 millones de antiprotones cada 100 segundos. Si funcionase sin interrupción durante todo un año, 24 horas al día, sólo generaría 10 picogramos de antiprotones.

Hace falta, en segundo lugar, una forma de almacenamiento de grandes cantidades de antimateria. Las trampas actuales sólo albergan algunos millones de átomos neutros. Un hipotético sistema, propuesto en 2003 por Steven D. Howe y Gerald P. Jackson, de Hbar Technologies, consistiría en almacenar el antihidrógeno ($\bar{H}$) en forma de "gránulos" sólidos (pues el hidrógeno, y por lo tanto el antihidrógeno, se solidifica a 14 K). Estos gránulos, que podrían tener un diámetro de unas 150 micras, recibirían una carga eléctrica y permanecerían en suspensión en una matriz de trampas electrostáticas.

Mas, aun cuando se dispusiera de una reserva apreciable de antimateria, la energía de aniquilación ha de convertirse en empuje. En la aniquilación de un electrón y un positrón la energía se libera en forma de dos rayos gamma, que vuelan en sentidos opuestos. La aniquilación protón-antiprotón produce unas partículas de vida efímera, los piones, dotadas de alta energía. Estas partículas podrían servir para calentar un núcleo de tungsteno, sobre el que se haría pasar hidrógeno. La expansión térmica del hidrógeno proporcionaría el empuje.



UNO DE LOS SISTEMAS que se han propuesto para la propulsión por antimateria lanzaría gránulos de antimateria contra velas recubiertas de uranio, donde provocarían explosiones de fisión atómica.

Un motor que utilizase campos magnéticos para dirigir y utilizar como propulsores a los propios piones sería mucho más eficiente, aunque mucho menor el empuje total, debido a la diminuta masa que se eyectaría.

Howe y Jackson han propuesto un tercer método de utilizar sus gránulos de antimateria con el fin de impulsar un velero espacial. La vela estaría confeccionada de carbono recubierto de uranio, en el cual se provocaría la fisión nuclear al dispararse contra ella gránulos sólidos de antihidrógeno. La eyección de los residuos de las fisiones henchiría la vela, que tiraría así de la nave. Por ahora, la posibilidad de que la antimateria induzca eficazmente la fisión es pura especulación.

No obstante, para verificarlo se necesitan muchísimos más antiátomos. E incluso entonces habría que dar un paso más antes de utilizarlos para contrastar la validez de CPT con precisión: se forman en estados muy excitados ("estados de Rydberg") y se debería "desexcitarlos" antes de someterlos a espectroscopía.

También el grupo ATHENA, en las postrimerías del año 2004, logró comprimir sus antiprotones en una columna delgada y densa en el centro mismo de su trampa. Tal configuración puede resultar muy útil para futuros experimentos en los que intervengan trampas magnéticas (necesarias para alojar a los átomos de antihidrógeno).

Los miembros de ATHENA han examinado algunas características de la producción de antihidrógeno: incluso cuando sus positrones se encuentran a temperatura ambiente (300 K), se producen casi tantos antiátomos como a la temperatura de trabajo de ATHENA, de sólo 10 K. Este resultado contradice las teorías sobre la formación de antiátomos que pronostican un número de antihidrógenos millares o millones de veces menor. Landua está firmemente convencido de que algún mecanismo adicional contribuye a estabilizar el antihidrógeno en ese plasma de mayor temperatura. (Gabrielse manifiesta su escepticismo acerca de tal conclusión.) Si el proceso estuviese verdaderamente reduciendo los antiátomos a su estado de mínima energía, como se necesita para la espectroscopía, tal descubrimiento sería una buena noticia para quienes desean poner a prueba la simetría CPT.

Ambos investigadores coinciden en que el principal problema que han de afrontar los dos grupos es la producción de átomos de antihidrógeno. Dichos antiátomos deberán gozar de dos propiedades: han de tener temperaturas inferiores a 0,5 K para que las trampas magnéticas puedan encerrarlos y han de hallarse, además, en su estado fundamental, o de mínima energía.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Bibliografía complementaria

PRODUCTION AND DETECTION OF COLD ANTIHYDROGEN ATOMS. M. Amoretti et al. en *Nature*, vol. 419, págs. 456-459; 3 de octubre, 2002.

BACKGROUND-FREE OBSERVATION OF COLD ANTIHYDROGEN WITH FIELD-IONIZATION ANALYSIS OF ITS STATES. G. Gabrielse et al. en *Physical Review Letters*, vol 89, n.º 21, págs. 213401-1-213401-4; 18 de noviembre, 2002.

THE ANTIPROTON: A SUBATOMIC ACTOR WITH MANY ROLES. John Eades en *CERN Courier*, vol. 43, n.º 6, julio/agosto de 2003. Disponible en cerncourier.com/main/article/43/6/17

FIRST MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF SLOW ANTIHYDROGEN ATOMS. G. Gabrielse et al. en *Physical Review Letters*, vol. 93, n.º 7, págs. 073401-1-073401-4; 13 de agosto, 2004.

Félix Tisserand y el efecto sombra

Entre los que nunca han llegado a ser conocidos por el gran público, no habrá habido astrónomo más importante que éste. Quedó ensombrecido por la fama de su compatriota Pierre-Simon Laplace

William I. McLaughlin y Sylvia L. Miller

Según el ensayista y poeta Ralph Waldo Emerson, una institución era "la sombra alargada de un solo hombre" y toda la historia se reducía a la biografía de "unas pocas personalidades con reciedumbre y seriedad". Es posible que los historiadores discrepen de Emerson, pero cuando un gigante alcanza el reconocimiento suficiente como para que su nombre se institucionalice en forma de adjetivo, como newtoniano o darwinista, quedan pocas dudas de que su sombra cubre una buena parte de la historia. Aunque la civilización esté en deuda con estos individuos, cabe preguntarse si no estaremos proyectando una luz excesiva sobre unos pocos. La historia de la ciencia proporciona ejemplos en los que la sombra de algunos gigantes eclipsa, sin que nos percatemos de ello, la consideración y las contribuciones de colegas suyos de menor talla.

Tal vez el ejemplo más claro de eclipse es el de Alfred Russel Wallace por parte de Charles Darwin. La fama alcanzada por el matemático y lógico Kurt Gödel ejerce un efecto similar sobre el reconocimiento que nos merece otro gran experto en lógica, Alfred Tarski. El mundo de las artes proporciona asimismo algunos ejemplos de este fenómeno. Mozart planea sobre su contemporáneo Salieri. Se ha dicho también que Shakespeare eclipsó la luz de otros dramaturgos isabelinos; él mismo fue consciente de este fenómeno cuando puso en boca de Casio las siguientes palabras acerca de César:

> ¡Claro, hombre! El se pasea por el mundo, que le parece estrecho,
> como un coloso, y nosotros, míseros mortales,
> tenemos que caminar bajo sus piernas enormes y atisbar por todas partes
> para hallar una tumba ignominiosa.

Las sombras de los personajes eminentes no sólo oscurecen la historia, sino que modifican la práctica cotidiana de la ciencia. En un artículo publicado en *Science* en 1968, el sociólogo Robert K. Merton se planteaba este problema e identificaba dos fenómenos que distorsionan el reconocimiento de los científicos y sus obras: "la 41ª silla" y el "efecto Mateo".

La 41ª silla se refiere al número de académicos de la Academia Francesa: restringido a 40, excluye a muchos autores distinguidos. Algunos de ellos alcanzaron gran fama al margen del reconocimiento institucional, como Descartes, Rousseau, Zola y Proust, pero su mérito indudable no hace sino

realzar el problema. Merton señalaba también que la concesión del premio Nobel encumbraba a algunos en detrimento de otros con el mismo talento. Uno de los efectos derivados es que quedan distorsionados los canales de comunicación, en el sentido de que un artículo científico donde aparece la firma de uno de los galardonados con dicho premio tendrá probablemente una audiencia más amplia que los demás.

No cuesta ver por qué estos reconocimientos pueden tener efectos perversos. Merton citaba a un galardonado con el premio Nobel que sostenía que el mundo tiende a favorecer a quienes ya son famosos. Merton lo denominó "efecto Mateo", a raíz de un fragmento del Evangelio según San Mateo: "Porque al que tiene se le dará y abundará; pero a quien no tiene, aun lo que tiene se le quitará".

Nuestro objetivo es proseguir en la línea de Merton, pero restringiremos el campo a la historia. Según nuestra propia definición y en ese contexto, el efecto sombra es el oscurecimiento del reconocimiento histórico de un científico en favor de otro como consecuencia de haber trabajado ambos en temas muy afines. El efecto sombra difiere del efecto Mateo, puesto que los que sufren el primero no siempre han sido poco reconocidos en vida. Wallace, Tarski, Salieri y los competidores de Shakespeare gozaron de la consideración de sus contemporáneos. El personaje que proyecta la sombra suele ser un científico más capaz que aquellos a los que pone en la penumbra. Por consiguiente, no se trata de luchar contra la injusticia, sino de conseguir que los historiadores de las ciencias no dejen demasiadas lagunas. La repetición sin fin de las biografías de un grupo selecto de científicos es algo así como imprimir siempre los mismos clásicos de la literatura. De vez en cuando, conviene iluminar las sombras.

Así pues, proyectaremos luz sobre la figura de François Félix Tisserand (1845-1896), uno de los astrónomos sobresalientes del siglo XIX. A lo largo de su vida recibió muchas recompensas. No puede decirse que fuese una víctima del efecto Mateo. Sin embargo, ha desaparecido del mapa, no sólo por estar a la sombra del gran



CORTESIA DEL OBSERVATORIO DE PARIS/*American Scientist*

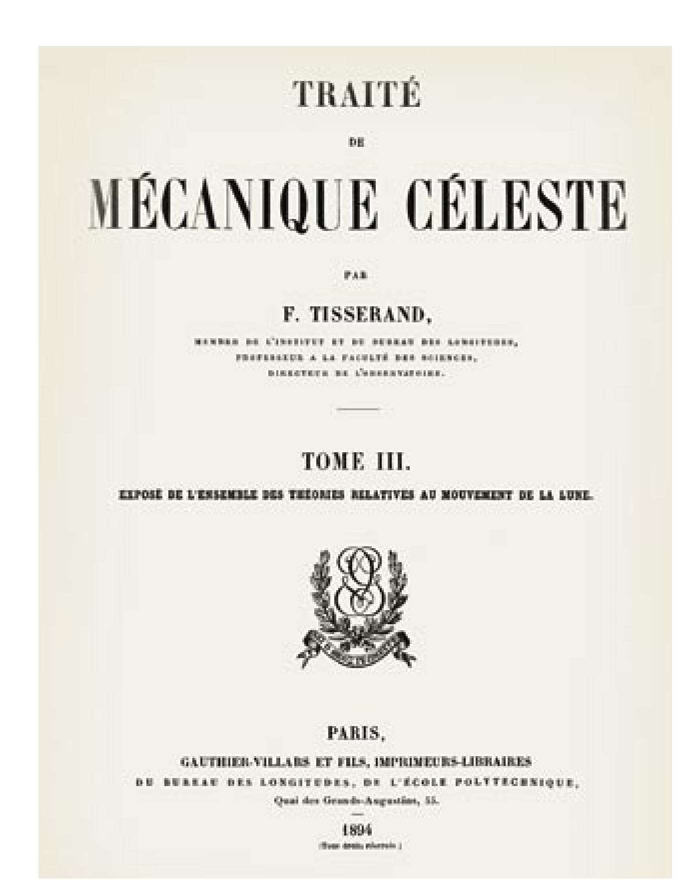
1. **FRANÇOIS FELIX TISSERAND** fue uno de los astrónomos más destacados del siglo XIX. Ejerció una enorme influencia en la astronomía francesa desde su cargo de director del Observatorio de París. Oscurecido por la sombra de Pierre-Simon Laplace, la historia le ha olvidado.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827), sino también por haber contribuido a su propio oscurecimiento con su modestia personal. Además, Tisserand sufrió las consecuencias de un accidente histórico. Su actividad se situó cerca del final de la tradición de la mecánica celeste, cuando la "astrofísica" empezaba a desplazar a la "astronomía". No es sorprendente, por tanto, que pocos conozcan el trabajo de este astrónomo; algo debe hacerse para recordar quién fue.

El trabajo de Tisserand

Tiene sentido comparar los trabajos de Tisserand y Laplace, ya que ambos escribieron sendos tratados magnos sobre mecánica celeste, que portaban idéntico título: *Traité de mécanique céleste*. En su obra establecían la situación de dicha disciplina a principios y a finales del siglo XIX. Como señaló Poincaré: "La mecánica celeste estaba a la espera de un nuevo Laplace. Tisserand nunca pensó que su trabajo fuera comparable al de su modelo; tal vez su modestia le hizo equivocarse".

Aunque el *Traité de mécanique céleste* fue sin duda el trabajo de mayor alcance de Tisserand, su versatilidad queda patente en sus trabajos relativos a la administración científica, la astronomía de observación, la mecánica celeste y la divulgación.



TRAITÉ

DE

MÉCANIQUE CÉLESTE

PAR

F. TISSERAND,

TOME III.

EXPOSÉ DE L'ENSEMBLE DES THÉORIES RELATIVES AU MOUVEMENT DE LA LUNE.

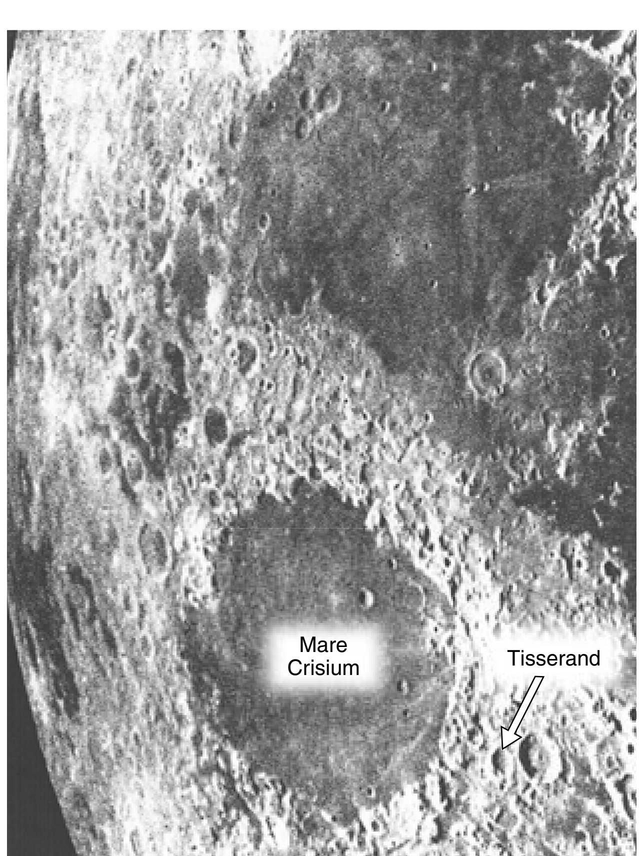
PARIS,

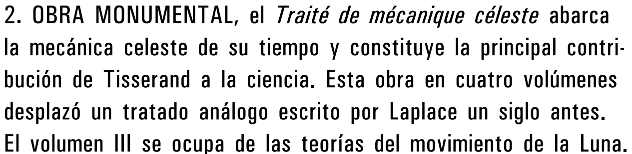
GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1894




2. OBRA MONUMENTAL, el *Traité de mécanique céleste* abarca la mecánica celeste de su tiempo y constituye la principal contribución de Tisserand a la ciencia. Esta obra en cuatro volúmenes desplazó un tratado análogo escrito por Laplace un siglo antes. El volumen III se ocupa de las teorías del movimiento de la Luna.

3. A LO LARGO DE LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX, el *Atlas Photographique de la Lune* no tuvo par. El trabajo, realizado en el Observatorio de París, se inició bajo la dirección de Tisserand. Esta fotografía, tomada el 25 de febrero de 1909, muestra la localización del cráter Tisserand.

Destacó en todo, salvo en la observación. Su capacidad de gestión superó con creces la de Laplace, a quien Napoleón Bonaparte retiró la cartera de Ministro del Interior sólo seis semanas después de haberlo nombrado. Además de su competencia técnica, los contemporáneos de Tisserand supieron apreciar su perseverancia, sentido del humor, juicio acertado y discreción al orientar a sus colaboradores.

Fue nombrado director del Observatorio de Toulouse en 1873, pero su cargo más relevante fue el de director del Observatorio de París, puesto al que accedió tras el fallecimiento del almirante Ernest Mouchez en 1892. De Tisserand se ha dicho que dirigía la vida astronómica del país desde ese puesto. En particular, gestionó la elaboración de la *Carte du Ciel*, un proyecto fotográfico que había iniciado Mouchez y que pretendía cubrir la totalidad del firmamento. Un proyecto menos conocido, pero que conservaría su importancia aun en los primeros años de la era espacial, fue la realización de un extraordinario atlas fotográfico de la Luna. Tisserand consiguió los fondos que hicieron posible el *Atlas Photographique de la Lune*, realizado por Maurice Loewy y Pierre Henri Puiseux con un telescopio de 60 centímetros. En ciertos aspectos, no se mejoraría este atlas hasta los años sesenta.

Tisserand invirtió una buena parte de su capacidad analítica en resolver algunos problemas que venían de lejos y pesaban mucho en la historia de la astronomía. El primero se refería a la descripción precisa del movimiento de la Luna. En el pasado, era frecuente que los astrónomos demostrasen su capacidad de análisis concibiendo teorías que explicasen los detalles del movimiento de nuestro satélite natural. Se trataba de una cuestión importante, que permitía contrastar las deducciones de la astronomía gravitatoria y tenía repercusiones civiles, científicas y religiosas. La teoría de la Luna constituye el volumen III del *Traité* de Tisserand. En él no sólo propuso sus propias teorías, sino que resumió, además, las contribuciones destacadas de otros, entre ellos Laplace. No se limitó a señalar los puntos fuertes y débiles del estado en que se encontraba la teoría lunar de entonces: apuntó diversas direcciones de investigación.

Tisserand investigó también la estabilidad del sistema solar. Para los astrónomos resulta crucial saber si un conjunto de cuerpos es estable, es decir, si se mantendrán agrupados gravitatoriamente dentro de un grupo más o menos compacto. Por ejemplo, los cúmulos abiertos de estrellas, es el caso de las Pléyades, mantendrán su identidad sólo durante unos centenares de millones de años antes de "disolverse" en la población estelar de nuestra galaxia. Por el contrario, los cúmulos globulares, como

WILLIAM I. MCLAUGHLIN Y SYLVIA L. MILLER/*American Scientist*

el M13 de Hércules, se hallan entre los objetos más antiguos de la Vía Láctea y durarán muchos miles de millones de años.

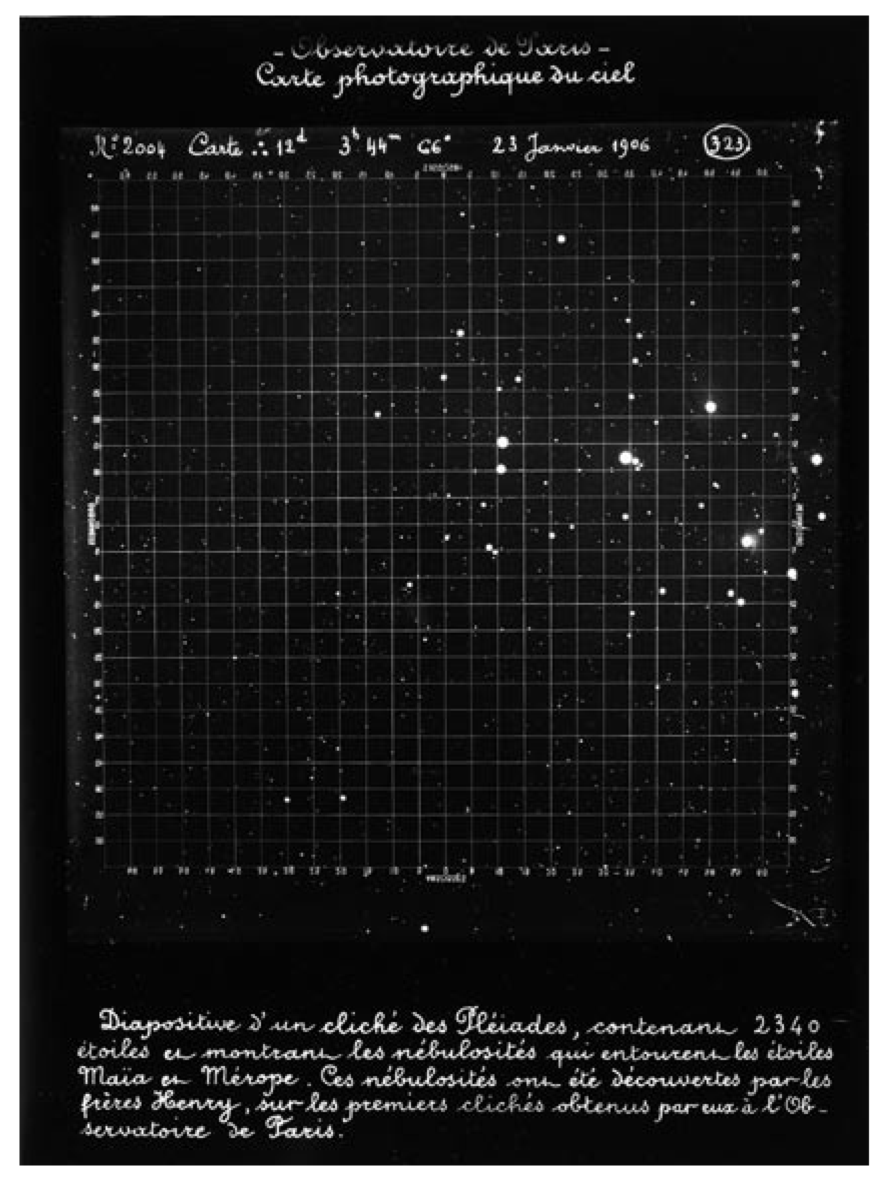
En cuanto al sistema solar, sólo cabe decir que "tal vez" sea estable. Una estrella que se acercase demasiado lo estabilizaría. Pero si en nuestro análisis consideramos sistema cerrado al formado por el Sol y los planetas podremos abordar el problema de dos maneras distintas: teórica y numéricamente. El enfoque numérico resulta limitado, ya que los ordenadores actuales no son capaces todavía de habérselas con la enorme escala de tiempos que hay que tener en cuenta, del orden de varios miles de millones de años. El enfoque teórico presenta dos posibilidades: generar un modelo del que pueda demostrarse que es estable, o eliminar (o no), una a una, las causas plausibles de inestabilidad. Tisserand se inclinó por la segunda posibilidad. Examinó el efecto de diversos movimientos planetarios para determinar si sus fuerzas gravitatorias pudieran, periódicamente, actuar en concierto y, por ende, disgregar el sistema solar. Encontró que tales mecanismos nunca provocarían semejante desastre natural.

El tercer campo de análisis de Tisserand, el problema de tres cuerpos, se centra en un tipo de grupos gravitatorios importantes en astronomía. El ejemplo por excelencia es el que forman el Sol, la Tierra y la Luna. A diferencia de lo que ocurre en el problema de dos cuerpos, resoluble de manera exacta mediante curvas cónicas, no es posible describir de forma sencilla las trayectorias de tres cuerpos que interaccionan entre sí, excepto en algunos casos especiales. Para soslayar tan espinosa dificultad, Tisserand utilizó instrumentos analíticos muy refinados que le permitieron conseguir avances importantes.

Además de estos temas de mecánica celeste, se interesó por la teoría de los satélites naturales, el achatamiento de Neptuno debido a su rotación (antes de que se observase el fenómeno) y muchas otras cuestiones. En 1878 ingresó en la *Académie des Sciences* y, al año siguiente, en el *Bureau des Longitudes*, del que fue secretario durante muchos años.

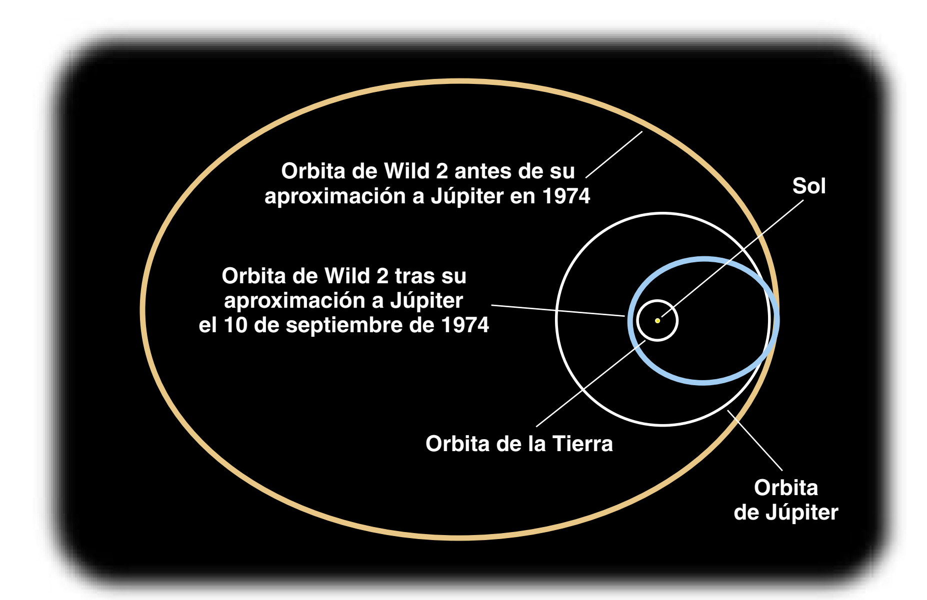
La divulgación de los conocimientos era para Tisserand parte inseparable de su profesión. Ejerció la enseñanza en distintos niveles. En el más avanzado, la precisión y la organización lógica de su *Traité*, muy apreciadas por todos aquellos que se adentraban en las partes más complejas de esta difícil disciplina, demostraron su capacidad expositiva. Eric T. Bell señalaba en su obra *Men of Mathematics*, como contrapunto, la falta de claridad del *Traité* de Laplace: "Laplace se interesaba por los resultados, pero no por la manera de obtenerlos. Para no tener que condensar un razonamiento matemático complejo en una presentación breve y comprensible, solía prescindir de todo, excepto de la conclusión..." El acierto de esta observación queda de manifiesto al leer la traducción al inglés de Nathaniel Bowditch, en la que casi la mitad del texto consiste en notas explicativas del traductor.

En el otro extremo, en el más popular, la contribución de Tisserand fue vasta. Explicó problemas técnicos y narró capítulos de la historia de la astronomía. Sus conferencias eran muy apreciadas por su claridad, tanto entre los especialistas como entre los



4. DURANTE SU ETAPA EN EL OBSERVATORIO DE PARIS, Tisserand dirigió la *Carte du Ciel*, el ambicioso proyecto de fotografiar la totalidad del firmamento. Aparecen estrellas de hasta magnitud 14, cifra que supone unos 10 millones de estrellas. Este atlas sigue siendo útil para determinar los movimientos propios de las estrellas por comparación con mediciones más recientes. La ilustración muestra el cúmulo abierto de las Pléyades.

CORTESIA DEL OBSERVATORIO DE PARIS/*American Scientist*



5. LA ORBITA DE WILD 2 se modificó sustancialmente en 1974, al aproximarse al planeta Júpiter. Si no se hubiese detectado el fenómeno, se habría pensado en la existencia de dos cometas, cuando en realidad sólo hay uno. Tisserand encontró una función sencilla, basada en los elementos orbitales del cometa, que se mantiene prácticamente invariante por la acción gravitatoria de Júpiter y, por lo tanto, vale para determinar la identidad de los cometas en distintas épocas. En el caso del cometa Wild 2, el valor numérico del "criterio de Tisserand" sólo se modificó en unos pocos puntos porcentuales. El criterio sigue utilizándose para estudiar la evolución de cometas y asteroides.

ADAPTACION DE UNA IMAGEN DE DONALD K. YEOMANS, DAVID A. SEAL Y RONALD C. BAALKE, *JPL/American Scientist*

profanos. Al comienzo de su carrera, dio clases de mecánica y mecánica celeste en la Facultad de Ciencias de París. En 1884 fundó el *Bulletin Astronomique*, del que fue director y donde publicó numerosos trabajos.

El legado de Tisserand

¿Qué ha quedado de François Félix Tisserand? En los registros de nombres de la cultura y la sociedad figuran un "cráter Tisserand" de la superficie lunar, un asteroide "3663 Tisserand" en órbita entre Marte y Júpiter y la "rue Tisserand" de París. Su localidad de nacimiento, Nuits-Saint Georges, ha erigido un busto suyo en la plaza del ayuntamiento y le ha dedicado una calle. La escuela que frecuentó en su juventud se llama ahora "Collège Tisserand".

Conocen su nombre los científicos que se ocupan de asteroides y cometas. Algunos aspectos de la clasificación y la evolución de estos pequeños cuerpos se rigen por la *invariante de Tisserand*, también llamada *criterio de Tisserand*. Se trata de una expresión algebraica sencilla, derivada de una formulación más compleja, la integral de Jacobi, análoga a la energía en una versión simplificada del problema de tres cuerpos. La invariante se ideó para decidir si dos trayectorias cometarias próximas a Júpiter se debían a un cometa o a dos. El planeta gigante modifica los elementos orbitales de los cuerpos que se le acercan, pero la invariante de Tisserand no se ve afectada. Si los valores numéricos de esta expresión para los elementos orbitales de antes y después de la aproximación al planeta no difieren apenas, lo más probable es que pertenezcan a un cometa.

No obstante la utilidad de esta expresión, consideramos que el legado principal de Tisserand reside en su *Traité*. Es una obra tan bien construida y tan amplia, que su lectura hoy sigue siendo provechosa pese a las nuevas orientaciones de la dinámica en el último siglo. Valgan como indicadoras de la importancia del *Traité* las once menciones de Tisserand, las siete del *Traité de mécanique céleste* y la mención solitaria del "criterio de Tisserand" que figuran en el índice de la *Historia General de la Astronomía* de René Taton y Curtis Wilson. En el último párrafo de su libro sobre las técnicas de mecánica celeste, Forest Ray Moulton, un astrónomo de comienzos del siglo XX, emitía un juicio sobre el *Traité*: "En el campo de la mecánica celeste en su conjunto, el mejor libro de que disponemos es el de Tisserand, y todo aquel que desee profundizar en esta materia debería leerlo".

El eclipse de Tisserand

A pesar de las contribuciones de Tisserand y del reconocimiento que alcanzó su obra, quedó ensombrecido por Laplace, cuya carrera científica presenta una profundidad y un alcance que sólo se encuentran en la de Newton. Además de sus trabajos de mecánica celeste, Laplace fue un pionero de la teoría de la probabilidad, investigó en el campo de las ecuaciones diferenciales, se interesó por algunos de los procesos fundamentales de la óptica, el sonido y las fuerzas intermoleculares, participó en la formulación del sistema métrico y puede considerársele uno de los fundadores de la física matemática.

Michael Shermer, autor de una biografía de Alfred Russel Wallace, explica por qué éste es mucho menos conocido que Darwin: "Era modestísimo. Este rasgo de su carácter contribuiría a su oscuridad". Algo parecido puede decirse de Tisserand. El astrónomo Jacques Lévy señala que, en el *Traité*, "Tisserand... presenta el trabajo de cada autor, simplifica su exposición y lo integra en sus propias investigaciones, pero no siempre deja claro qué se le debe en realidad a él. Incorpora en el *Traité* de esta forma treinta trabajos. Como es frecuente que los autores de las obras modernas sobre mecánica celeste saquen más información del *Traité* que de los trabajos originales, se siguen difundiendo las contribuciones de Tisserand, pero sin atribuírselas. Tisserand, un hombre muy modesto, habría aprobado sin duda este proceder".

Lévy nos habla también del estilo de Laplace: "Laplace integraba en su texto los trabajos de sus predecesores y, por consiguiente, se le atribuían resultados que no había obtenido él". ¡Un caso claro del efecto Mateo!

Si a la repercusión de la fama de Laplace se une la modestia de Tisserand, queda claro que las circunstancias de la época se conjuraron

para situar a Tisserand en la poco halagadora posición de ser la figura principal de una disciplina que iniciaba una relativa decadencia. La astronomía del siglo XIX reordenó progresivamente sus prioridades para sacar partido de los nuevos descubrimientos de la física. A comienzos de ese siglo, la mecánica celeste, entonces en manos de Laplace, generó un flujo incesante de conocimientos sobre los movimientos de los planetas y los satélites. La mecánica celeste se encontraba en "la cresta de la ola" de la ciencia. Con el paso del tiempo, se formuló el principio de conservación de la energía, se desarrolló la termodinámica, la espectroscopia se convirtió en una herramienta de investigación y Maxwell codificó el electromagnetismo. Simboliza la importancia creciente de la física no gravitatoria en la investigación astronómica la fundación en 1895 de la revista *Astrophysical Journal*, complemento del *Astronomical Journal*, fundado en 1849.

Es más, la propia mecánica celeste experimentó un cambio profundo. Entre 1892 y 1899, Henri Poincaré publicó *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste,* obra que, fiel a su título, transformó la disciplina al crear una nueva rama en la que intervenían la topología (de la que Poincaré fue uno de los fundadores) y la teoría de la medida, dominio que los matemáticos estaban creando para analizar estructuras que no podían explicar con el análisis de Newton y Leibniz. Junto a la mecánica clásica de Newton, Laplace y Tisserand, fue apareciendo, pues, un nuevo ámbito que iba a florecer en el siglo XX y que alcanzaría grandes alturas en el decenio de 1950 con los descubrimientos del matemático ruso Andrei N. Kolmogorov. Después de Kolmogorov, el camino abierto por Poincaré permitió la comprensión del caos y la explicación de por qué determinados esfuerzos de la mecánica clásica estaban abocados al fracaso.

Las innovaciones de Poincaré dieron paso, en el siglo XX, a una alianza entre la nueva mecánica celeste y la investigación matemática contemporánea, de la misma manera que en el siglo anterior se había producido una convergencia entre la mecánica celeste y la física. Sin embargo, la mecánica celeste no terminó con Tisserand. A lo largo del siglo XX vieron la luz destacados trabajos relacionados con el sistema solar y los sistemas estelares, si bien no ocuparon el centro mismo del interés de la astronomía, orientada ya hacia la evolución estelar y la cosmología.

Tras el lanzamiento de satélites artificiales en los años cincuenta, la mecánica celeste clásica volvió a escindirse y se acercó a la ingeniería espacial. La mecánica celeste desempeña un papel crucial en el diseño de las misiones y la navegación de los vehículos espaciales. A ella se debe una técnica fundamental de la astronáutica, la "ayuda gravitatoria", que aprovecha los campos gravitatorios de los planetas para modificar los parámetros de vuelo de las sondas espaciales. En cuanto se pusieron en órbita los primeros satélites alrededor de la Tierra, se comprendió que la mecánica celeste clásica se había quedado anquilosada; para corregir el problema se modificaron los planes de estudio científicos y se reimprimió el *Traité* de Tisserand, que habría de servir de solución de urgencia mientras no hubiese nuevos libros de textos.

Aunque podría decirse que también Poincaré proyectó una nueva sombra sobre Tisserand, preferimos considerar al matemático como un representante del cambio que experimentó la mecánica celeste. A pesar de ser uno de los gigantes, a Poincaré no le hacen justicia los libros de historia escritos en inglés y, al menos en ellos, no proyecta ninguna sombra. Los cambios en las prioridades científicas dan la impresión de que Tisserand quedó encerrado en un callejón sin salida científico, pero resultaría más apropiado decir que Tisserand fue el último eslabón de una fecunda tradición.

Epílogo

Esperamos que el lector considere que ha merecido la pena llamar su atención hacia la figura de Tisserand. Compararle con Laplace no da su justa medida. Pese a la diversidad de sus méritos, la talla de Tisserand la da su *Traité*, en el que, como observó Poincaré, se codea con gigantes. Por último, su bondad resplandece con la misma intensidad que sus logros científicos. Como dijo el propio Poincaré en el entierro de Tisserand: "Cada vez que veamos su nombre, nos parecerá que sigue estando entre nosotros. Y afirmo que siempre lo estará, ya que el recuerdo del hombre, del amigo fiel, no se desvanecerá antes de que desaparezcan todos aquellos que le hemos conocido. El recuerdo del científico perdurará eternamente".

Los autores

William I. McLaughlin trabajó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro hasta su jubilación en 1999. La NASA le concedió la medalla de servicios excepcionales por su labor al frente de la planificación de la misión del satélite de infrarrojos IRAS. Lleva su nombre el asteroide 4838 Billmclaughlin. **Sylvia L. Miller** llegó la Laboratorio de Propulsión a Chorro en 1968 y desde 1995 se ocupa de la planificación de las futuras misiones a Marte. Es la responsable actual del programa de acceso subterráneo a Marte. Recibió la medalla de servicios excepcionales por su trabajo en el proyecto IRAS.

Bibliografía complementaria

PERTURBATIONS DES PLANÈTES D'APRÈS LA MÉTHODE DE LA VARIATION DES CONSTANTES ARBITRAIRES. F. Tisserand en *Traité de mécanique céleste*, vol. I. Gauthier-Villars et Fils; París, 1889.

THÉORIE DE LA FIGURE DES CORPS CÉLESTES ET DE LEUR MOUVEMENT DE ROTATION. F. Tisserand en *Traité de mécanique céleste*, vol. II. Gauthier-Villars et Fils; París, 1891.

EXPOSÉ DE L'ENSEMBLE DES THÉORIES RELATIVES AU MOUVEMENT DE LA LUNE. F. Tisserand en *Traité de mécanique céleste*, vol. III, Gauthier-Villars et Fils; París, 1894.

THÉORIES DES SATELLITES DE JUPITER ET DE SATURNE. PERTURBATIONS DES PETITES PLANÈTES. F. Tisserand en *Traité de mécanique céleste*, vol. IV. Gauthier-Villars et Fils; París, 1896.

Cómo y dónde se originó el maíz

Tras un largo período de discrepancias, por fin se ha perfilado un consenso: el maíz procede del teosinte. El debate se centra ahora en si la domesticación fue unicéntrica o multicéntrica

Takeo Angel Kato Yamakake

El origen del maíz ha sido objeto de controversia durante más de una centuria. Por ceñirnos a su identidad y número de ancestros, las teorías que han intentado explicar la domesticación de esta gramínea se resumen en dos hipótesis fundamentales. La primera considera que el maíz cultivado moderno procede de un maíz silvestre extinto (del cual no se ha hallado prueba alguna); propone, además, que el teosinte constituye un producto de la hibridación entre dos gramíneas silvestres: un maíz primitivo y el *Tripsacum*. La segunda, y la que goza de mayor aceptación, supone que el maíz tuvo un solo ancestro directo: el teosinte.

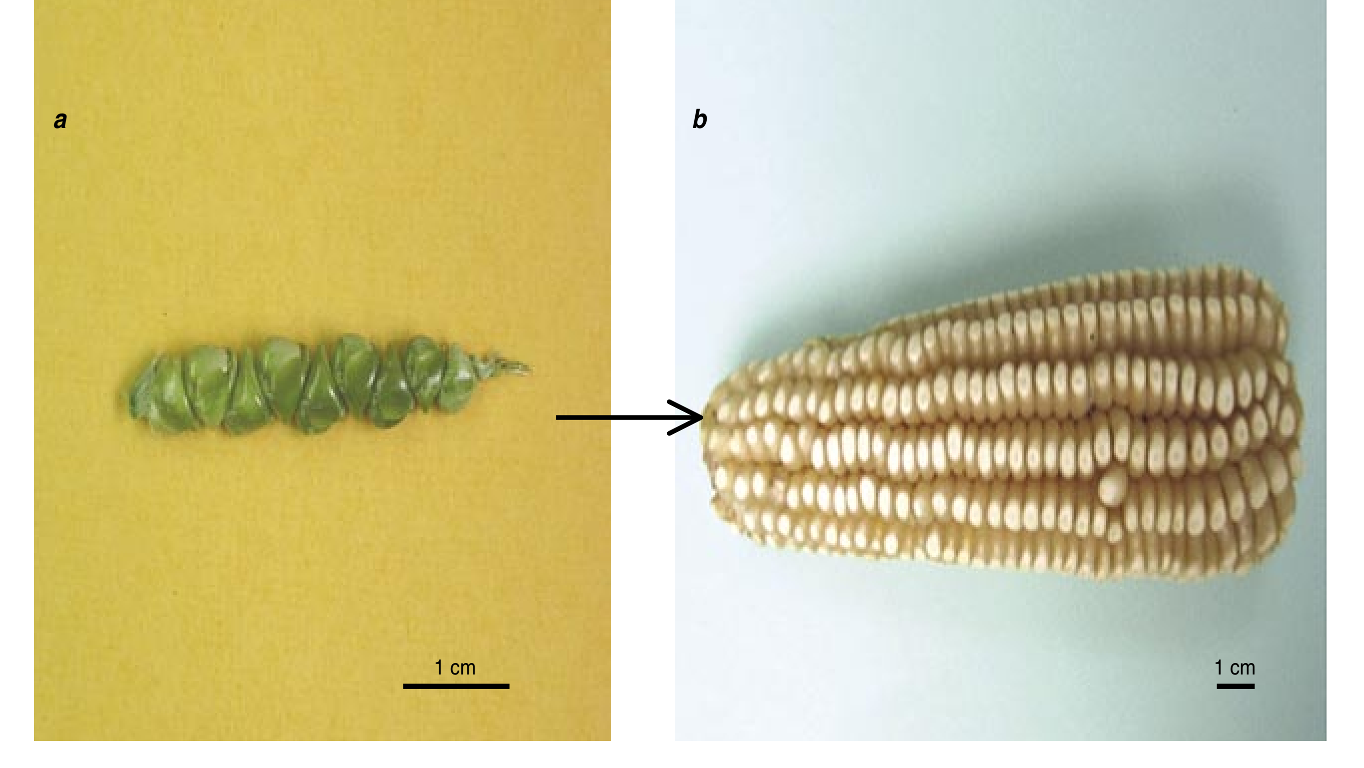
Así, pues, hoy se acepta que esta gramínea cultivada se originó a partir del teosinte, hace unos 8000 años en Mesoamérica. La discusión se centra ahora en la distribución geográfica de la domesticación: ¿ocurrió ésta en un solo lugar (unicéntrica) o en varios (multicéntrica)? El estudio de la disposición de los nódulos cromosómicos, en función de la región y la raza, respalda la propuesta multicéntrica. El análisis filogenético de la constitución de microsatélites en el maíz y el teosinte, en cambio, apoya la opción unicéntrica. De la comparación de las dos hipótesis se deduce que ambas conforman la historia evolutiva del maíz.

¿Maíz silvestre o teosinte?

La domesticación del maíz no ha dejado huellas materiales directas, al menos a nuestro alcance, que den pistas sobre lo ocurrido hace 8000 años. Esto lo convierte en un fenómeno difícil o imposible de demostrar. Las conclusiones dependen entonces de las pruebas indirectas y, por tanto, la discrepancia entre los expertos está garantizada.

La primera teoría sobre el origen del maíz la esbozaron Paul Mangelsdorf y Robert G. Reeves en 1939, entonces en la Universidad de Harvard. A tenor de la misma, el maíz moderno deriva de un maíz silvestre, ahora extinto, y el teosinte, el pariente más cercano del maíz, es producto de la hibridación del maíz primitivo hipotético y el *Tripsacum,* otra gramínea silvestre muy abundante en México y otros países americanos [*véase* “El origen del maíz”, por Paul C. Mangelsdorf; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1986]. La posterior evolución del maíz domesticado se debería a la influencia del teosinte y el *Tripsacum*.

La tesis de Mangelsdorf y Reeves ha sufrido varias modificaciones, siendo la última la que propone que el maíz actual proviene del cruzamiento del maíz silvestre hipotético y *Zea diploperennis*, un teosinte perenne diploide descubierto en 1979 en la Sierra de Manantlán, en el estado de Jalisco, por Rafael Guzmán, estudiante de botánica a la sazón en la Universidad de Guadalajara. El elemento central de esta hipótesis, sin embargo, sigue siendo el mismo: el postulado de un maíz silvestre hipotético, de cuya existencia no se tiene hasta la fecha prueba alguna.



1. DEL TEOSINTE AL MAIZ. La pequeña inflorescencia femenina dística del teosinte (*a*, mazorca inmadura) se transformó en la enorme inflorescencia polística del maíz (*b*, mazorca madura).

TAKEO ANGEL KATO YAMAKAKE

La segunda teoría sostiene que el maíz se originó a partir de un grupo taxonómico, el teosinte, mediante la selección que el hombre aplicó durante la domesticación. En la actualidad, esta teoría monofilética (que propone un solo grupo taxonómico como ancestro evolutivo) es la que goza de mayor aceptación entre los expertos. Comparada con la primera, resulta mucho más razonable. Por un lado, no necesita postular la existencia de ningún antepasado hipotético, dado que el teosinte existe en sus formas silvestre o semisilvestre. Por otro, el teosinte constituye el pariente más cercano del maíz desde el punto de vista taxonómico, morfológico, citológico y genético.

Con todo, durante muchas décadas esta teoría dejaba pendiente una cuestión crucial: ¿cómo pudo la pequeña inflorescencia femenina dística (dos hileras de granos) del teosinte transformarse en la enorme inflorescencia polística (muchas hileras de granos) del maíz? En 1972, George W. Beadle, entonces en la Universidad de Chicago, propuso que los caracteres fundamentales que distinguen al maíz del teosinte proceden de la expresión de cinco genes [*véase* "El origen del maíz", por George W. Beadle; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1980]. Estudios posteriores dirigidos por John Doebley, de la Universidad de Wisconsin, identificaron esas cinco secuencias genéticas. La cuestión quedó así resuelta.

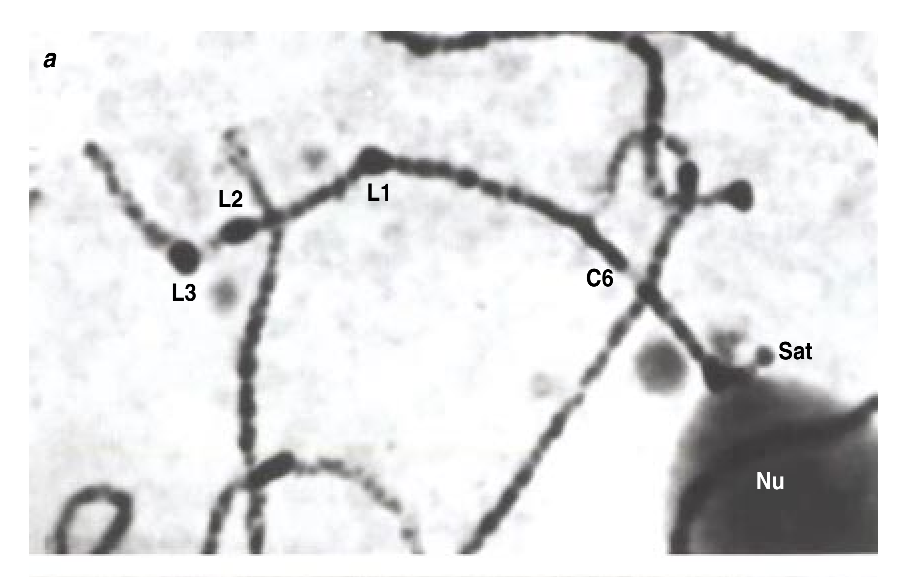
De acuerdo con esta propuesta, el maíz se originó en el área de distribución del teosinte: Mesoamérica. Este territorio se extiende desde la parte central de México hasta Honduras y Nicaragua. Queda por averiguar si la domesticación ocurrió en varias regiones, y por tanto fue multicéntrica, o bien en alguna región mesoamericana en concreto, y por tanto unicéntrica. Asimismo, aun admitiendo el protagonismo del teosinte, cabe precisar si el maíz se originó a partir de una sola raza de teosinte o bien todos los teosintes llevaron al maíz.

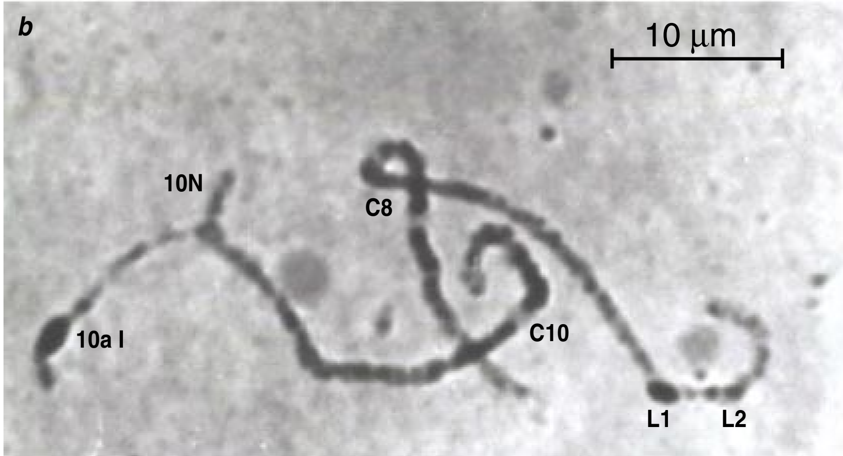
En el año 1978, Barbara McClintock, entonces en la unidad de genética que la Institución Carnegie de Washington tiene en Cold Spring Harbor, Nueva York, y el propio autor en 1984 desarrollaron una teoría del origen del maíz multicéntrica, basada en la variación y distribución de la morfología cromosómica que muestran las poblaciones americanas de maíz así como de teosinte. Recientemente, Yoshihiro Matsuoka y su grupo, de la Universidad de Wisconsin, han avanzado una teoría unicéntrica, que se apoya en la constitución de microsatélites de ambos tipos de plantas, originarias también del continente americano. Sirva este artículo para describir y comparar ambas propuestas.

Morfología cromosómica

Una de las herramientas más útiles para ahondar en el origen y la evolución del maíz nos la ofrece la comparación de la morfología de sus cromosomas, así como la de su ancestro, el teosinte. (En concreto, se estudia el material paquiténico de la profase I de la microsporogénesis, división meiótica que ocurre en las anteras.) Se analizan tres aspectos: los brazos cromosómicos, los cromómeros y los nódulos. De los brazos se mide la longitud y la relación de brazos (cociente entre la del brazo largo y la del brazo corto), de los cromómeros se estudia el patrón de distribución y de los nódulos la posición, la variación en tamaño y la distribución racial y geográfica.

La longitud promedio de cada uno de los 10 cromosomas de estas gramíneas no muestra diferencias significativas entre el maíz y el teosinte; lo mismo ocurre con la relación de brazos. Tampoco aparecen divergencias notables entre los patrones de distribución de los cromómeros. Los genomas sin nódulos del maíz y del teosinte son muy similares, si no idénticos; constituyen lo que el autor ha denominado una "morfología cromosómica básica". Por tanto, resulta difícil o imposible concebir que pudieran originarse y evolucionar





2. CROMOSOMAS PAQUITENICOS de maíz con nódulos intercalares. En la micrografía superior (*a*) se muestra el cromosoma 6 (C6) con nódulos grandes en las posiciones L1, L2 y L3; se observa también el nucleolo (Nu) con el organizador nucleolar (ON) y el satélite (Sat). Abajo (*b*), se ilustra el cromosoma 8 (C8) con nódulos mediano en L1 y pequeño en L2 junto con un cromosoma 10 anormal tipoI heterocigótico; presenta el segmento adicional (10aI) y el nódulo grande subterminal característico; se observa también el segmento terminal del cromosoma 10 normal (10N).

TAKEO ANGEL KATO YAMAKAKE

de forma independiente uno del otro. Esta constituye, quizá, la prueba más convincente de que el maíz y el teosinte guardan una estrecha relación en su origen y posterior evolución.

Los nódulos cromosómicos corresponden a segmentos heterocromáticos constituidos, en su mayoría, por secuencias de ADN de 185 pares de bases, que se repiten miles o incluso millones de veces, dependiendo del tamaño del nódulo. En relación con la morfología cromosómica existen dos grandes grupos de teosintes. En el primero se incluyen aquellos en los que predominan los nódulos cromosómicos intercalares, como ocurre en las razas anuales mexicanas: Chalco, Mesa Central, Durango, Nobogame y Balsas. Al segundo grupo pertenecen teosintes cuyos cromosomas sólo contienen nódulos terminales: las especies perennes mexicanas (de Jalisco) *Zea diploperennis* y *Z. perennis,* y la especie y raza guatemaltecas *Z. luxurians* y Huehuetenango.

Existen varias pruebas que indican que los nódulos cromosómicos son estructuras muy conservadoras desde el punto de vista evolutivo. Veamos cuatro de ellas. En primer lugar, los nódulos de diferente tamaño y alojados en posiciones fijas de los cromosomas del maíz pueden mantenerse sin experimentar cambio alguno durante muchas generaciones. En segundo lugar, el maíz y el teosinte anual mexicano han sobrevivido miles de generaciones sin desarrollar nuevos nódulos terminales en sus cromosomas (los nódulos terminales existentes deben haber estado ahí desde el origen de esas especies); lo mismo ocurre con el teosinte de Guatemala y los teosintes perennes, que poseen solamente nódulos terminales y no han desarrollado ningún nódulo intercalar desde hace varios milenios. En tercer lugar, al estudiar las razas de maíz de territorios sudamericanos elevados, McClintock descubrió en 1959 que la mayoría de esas razas poseen casi exclusivamente dos nódulos pequeños, uno en cada brazo largo de los cromosomas 6 y 7, y que esta combinación se distribuye en un amplio territorio y número de razas, lo que indica que los nódulos en cuestión se han perpetuado durante centurias, si no milenios. En último lugar, ciertos tipos de nódulos se encuentran presentes en maíces de un territorio determinado y ausentes en otros, en ocasiones muy distantes; ello sugiere que la evolución de dichos nódulos es conservativa pues, de lo contrario, se encontrarían los diferentes tipos de nódulos distribuidos al azar, tanto racial como territorialmente.

De los estudios publicados en 1981 por McClintock y sus colaboradores sobre la distribución de nódulos cromosómicos en razas de maíz de casi todo el continente americano y los realizados por el autor posteriormente en maíz, así como en teosinte, se deduce que el maíz guarda un gran parecido con los teosintes anuales mexicanos con predominancia de nódulos intercalares. Lo que diferencia estas dos gramíneas es el número de posiciones de cuerpos heterocromáticos, superior en los teosintes. Los otros teosintes, además de tener pocos nódulos en común con el maíz, solamente poseen nódulos en los extremos cromosómicos (nódulos terminales).

Tal similitud en la morfología cromosómica de ambos tipos de plantas constituye una prueba inequívoca de que el maíz surgió de la domesticación del teosinte. Asimismo, de acuerdo con las pruebas a favor de la estabilidad evolutiva de los nódulos cromosómicos y las diferencias

DISTRIBUCION GEOGRAFICA DEL TEOSINTE

LA DISTRIBUCION DEL TEOSINTE en Mesoamérica, y en concreto en México, no es uniforme. Algunas poblaciones se concentran en superficies inferiores a un kilómetro cuadrado; otras se extienden en áreas de cientos de kilómetros cuadrados. Se han encontrado poblaciones de esta planta desde la Sierra Madre Occidental, en el suroeste del estado de Chihuahua, hasta Nicaragua. Crece desde los 500 a los 2600 metros de altitud. En el mapa aparece la distribución geográfica de las diferentes especies y razas de teosinte en México y Guatemala. Las fotografías muestran poblaciones de teosinte que medran a cierta distancia de los cultivos de maíz.

Zea mexicana
- RAZA MESA CENTRAL
- RAZA CHALCO
- RAZA DURANGO
- RAZA NOBOGAME
- RAZA BALSAS
- RAZA HUEHUETENANGO

- *Zea luxurians*
- *Zea diploperennis*
- * *Zea perennis*

Baja California Norte, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Baja California Sur, Sinaeoa, Durango, Zacatecas, Tamaulipas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tiaxcala, Nayarit, Jalisco, Colima, México, Michoacán, Morelos, Puebla, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Belice, Guatemala

MAIZ / TEOSINTE — Estado de México

MAIZ / TEOSINTE — Teloloapán

MAIZ / TEOSINTE — San Cristóbal Honduras

en la presencia de estas estructuras heterocromáticas en los genomas del maíz y los distintos teosintes, la domesticación del maíz debió de ocurrir a partir de poblaciones del teosinte anual mexicano. Las poblaciones guatemaltecas y las especies perennes de Jalisco, en cambio, por alguna razón aún desconocida, no intervinieron en el proceso. Cabe preguntarse también si la separación geográfica de las dos morfologías cromosómicas (las poblaciones con predominancia de nódulos intercalares, por un lado, y las que contienen sólo nódulos terminales, por otro) tuvo alguna relación con la posibilidad de que el hombre de hace ocho mil años seleccionara plantas primitivas de maíz a partir de unas (las "intercalares") y no de otras (las "terminales"). Todavía no se ha hallado la respuesta; esperemos que las investigaciones futuras arrojen luz sobre esta cuestión.

Existe en el maíz y el teosinte una variante de su cromosoma 10 que posee unido al extremo de su brazo largo un segmento eucromático de longitud similar al de su brazo corto, que contiene un nódulo grande subterminal. Se trata del cromosoma 10 anormal tipo I. Se ha hallado en poblaciones de maíz, teosinte anual mexicano y, a principios de la pasada década, en *Z. diploperennis* de Jalisco, pero no en los teosintes guatemaltecos. La presencia del cromosoma 10 anormal en *Z. diploperennis* podría inducir a pensar que esta especie sí estuvo involucrada en el origen del maíz; sin embargo, la abundancia de nódulos terminales que no se encuentran en el maíz desecha esta posibilidad. Posiblemente corresponde a un remanente de la época en que los teosintes anuales mexicanos se separaron de los guatemaltecos y perennes, fenómeno que ocurrió mucho antes de que el hombre domesticara el maíz.

Existe otra variante del cromosoma 10 anormal, el tipo II, cuyo segmento extra del brazo largo termina en un nódulo pequeño o mediano. Esta variante tipo II se ha observado solamente en poblaciones de teosinte anual mexicano. Como en el caso de algunos nódulos cromosómicos, que se encuentran exclusivamente en el teosinte anual mexicano, se desconoce el motivo por el cual el cromosoma 10 anormal tipo II no existe en el maíz, en la hipótesis de que sea ésta una planta domesticada a partir del primero.

Los cromosomas accesorios, supernumerarios o de tipo B se han encontrado solamente en poblaciones de maíz y teosintes anuales mexicanos. Este hallazgo corrobora la hipótesis de que el maíz proviene de la domesticación de estos teosintes, mientras que los perennes y los guatemaltecos no participarían en el proceso.

Domesticación multicéntrica

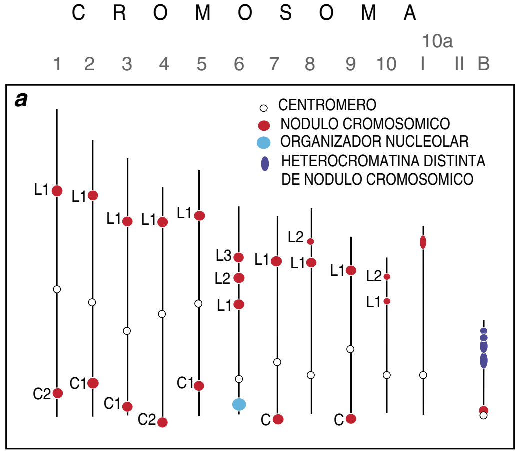
Tras razonar que el maíz procede del teosinte anual mexicano que medró en Mesoamérica hace unos ocho mil

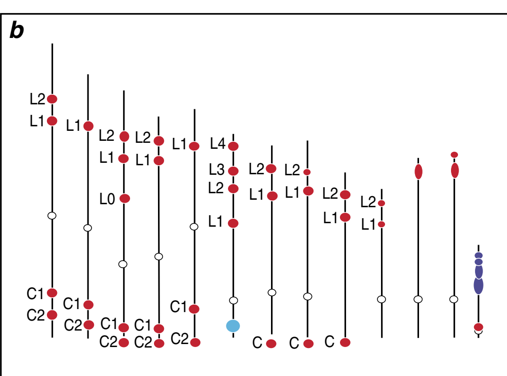
TAKEO ANGEL KATO YAMAKAKE

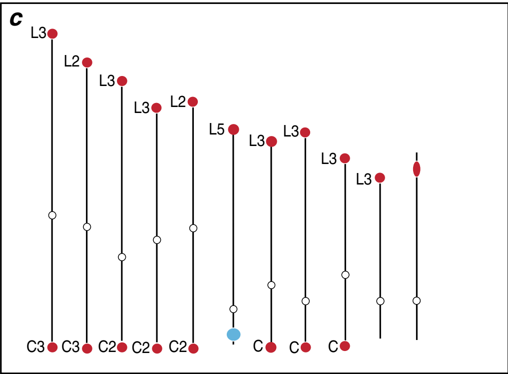
años, es el momento de indagar sobre la localización geográfica del proceso. ¿En qué región se produjo la domesticación? ¿Ocurrió sólo en un lugar determinado (origen unicéntrico) o en varios (origen multicéntrico)?

La distribución geográfica y racial de los nódulos cromosómicos avala la hipótesis de la domesticación multicéntrica. Se ha localizado cada tipo de nódulo cromosómico (pequeños, medianos y grandes) en función del origen geográfico y la raza de las muestras de maíz. Se observa que la distribución geográfica y racial de los nódulos cromosómicos no responde precisamente al azar. Unos se distribuyen de forma restringida siguiendo patrones bien definidos, otros lo hacen de forma general, sin pauta alguna, y otros, por fin, muestran distribuciones intermedias, combinaciones de al menos dos de los patrones de distribución restringida.

Para comprender mejor cómo se ha llegado a formular la hipótesis de la domesticación multicéntrica, esbocemos una somera descripción de los patrones de distribución que se observan en el genoma del maíz. Cada uno de ellos, Zapalote, Mesa Central, Pepitilla, Tuxpeño y Altos de Guatemala, se caracteriza por un conjunto particular de nódulos; por ello reciben el nombre de *complejos* de nudos cromosómicos.







3. DIFERENCIAS MORFOLOGICAS de los cromosomas de (*a*) maíz, (*b*) teosinte anual mexicano y (*c*) teosintes guatemaltecos y perennes de Jalisco. Además de los 10 cromosomas característicos de estas gramíneas, se muestran las variantes del cromosoma 10 anormal (10a), tipo I y tipo II, así como los cromosomas accesorios de tipo B. La posición de cada elemento morfológico se indica mediante una letra (*L* para el brazo cromosómico largo y *C* para el corto) y una cifra (que corresponde al *locus*).

El complejo "Zapalote" se concentra en las razas Zapalote Chico, Zapalote Grande y Bolita. Medra en la región de Oaxaca-Chiapas. Escasea en la costa del Pacífico, donde aparece en algunas poblaciones de otras razas. Esta distribución sugiere que las poblaciones de teosinte de Oaxaca-Chiapas protagonizaron un proceso de domesticación que originó un germoplasma (material genético hereditario) primigenio de maíz. Transcurrido cierto tiempo y una vez que este germoplasma sufrió alguna variación, se habría distribuido a lo largo de la costa del Pacífico, al paso que se constituía una ruta de migración humana.

De la distribución del complejo "Mesa Central" se deduce que en la Mesa Central (región elevada del centro de México) tuvo lugar otra domesticación, independiente de la de Oaxaca-Chiapas. De ahí habría surgido un germoplasma primigenio, que luego se diversificó en los precursores de las actuales razas Cónico, Palomero Toluqueño, Arrocillo Amarillo y Chalqueño, típicas de esta región. Posteriormente, se dispersó hacia el centro norte de México hasta las actuales regiones fronterizas con EE.UU. Durante esa migración, posiblemente se desarrolló, entre otras, la raza Cónico Norteño. Este germoplasma también se desplazó hacia el oeste, donde convergiría con el maíz de Oaxaca-Chiapas; en el camino se habría mezclado con el complejo "Pepitilla". Por fin, los tres complejos emigrarían juntos hacia el noroeste de México.

El complejo "Pepitilla" se encuentra en las poblaciones de la raza Pepitilla y su emparentada Maíz Ancho, que medran en los estados de Morelos, Guerrero, México, Michoacán y Guanajuato. Se ha distribuido hacia los estados de Jalisco y Nayarit, en el oeste de México, y de ahí hacia el noroeste siguiendo hasta el este de los EE.UU. De acuerdo con este patrón, en la región del norte de Morelos y Guerrero y el suroeste del estado de México (donde predomina la raza Pepitilla) se habría producido otra domesticación. Este maíz original, posiblemente ya mezclado con el complejo Mesa Central, fue llevado al oeste; de ahí, junto con el complejo Zapalote, emigró al noroeste de México y finalmente se distribuyó por el actual territorio estadounidense.

La domesticación del complejo "Tuxpeño" parece haber ocurrido nuevamente en el territorio de los actuales estados de Oaxaca-Chiapas, si bien de forma independiente del maíz que emigró por la costa del Pacífico (complejo Zapalote). Se trasladó principalmente hacia la costa del golfo de México; y desde ahí progresó hacia el norte, a los actuales estados de Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila y Chihuahua. Luego, invadió el sur de los EE.UU. Tales flujos migratorios influyeron en los maíces de las regiones elevadas de la Mesa Central. A partir de este germoplasma se desarrollaron las razas de maíz Tuxpeño, Vandeño y

TAKEO ANGEL KATO YAMAKAKE

CLASIFICACION TAXONOMICA

Ni para la filogenia del maíz y el teosinte ni para su taxonomía existe una propuesta única. Aunque en el artículo se emplea la clasificación tradicional, se cuenta otra alternativa ligeramente distinta (*tablas*).

En la clasificación tradicional, avanzada en 1967 por Garrison H. Wilkes, de la Universidad de Massachusetts, maíz y teosinte anual pertenecen a especies distintas: *Z. mays* y *Z. mexicana* respectivamente. A su vez, cada especie se divide en varias razas (*véase la tabla*). Posteriormente se han encontrado especies perennes de teosinte en el estado mexicano de Jalisco. Por defecto, ésta es la clasificación que se sigue en el artículo.

<table>
<tr><th colspan="3">CLASIFICACION TRADICIONAL (WILKES 1967)</th></tr>
<tr><th>ESPECIE</th><th>RAZA</th><th></th></tr>
<tr><td>Z. mays</td><td>30 razas mexicanas y centenares en el resto del mundo</td><td>Maíz cultivado</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Z. mexicana</td><td>Chalco</td><td rowspan="7">Teosinte anual</td></tr>
<tr><td>Mesa Central</td></tr>
<tr><td>Durango</td></tr>
<tr><td>Nobogame</td></tr>
<tr><td>Balsas</td></tr>
<tr><td>Huehuetenango</td></tr>
<tr><td>Guatemala</td></tr>
<tr><td>Z. perennis</td><td></td><td>Teosinte perenne</td></tr>
</table>

En 1980, Hugh Iltis y John Doebley, de la Universidad de Michigan, presentaron una clasificación alternativa que une el maíz y los teosintes anuales mexicanos en una sola especie: *Z. mays*. Además, añade las especies *Z. luxurians* y *Z. diploperennis*, y agrupa las distintas razas en subespecies (*véase la tabla*).

<table>
<tr><th colspan="4">CLASIFICACION ALTERNATIVA (ILTIS Y DOEBLEY 1980)</th></tr>
<tr><th>ESPECIE</th><th>SUBESPECIE</th><th>RAZA</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="7">Z. mays</td><td>mays</td><td>Muchas razas diferentes</td><td>Maíz cultivado</td></tr>
<tr><td rowspan="4">mexicana</td><td>Chalco</td><td rowspan="7">Teosinte anual</td></tr>
<tr><td>Mesa Central</td></tr>
<tr><td>Durango</td></tr>
<tr><td>Nobogame</td></tr>
<tr><td>parviglumis</td><td>Balsas</td></tr>
<tr><td>huehuetenanguensis</td><td>Huehuetenango</td></tr>
<tr><td>Z. luxurians</td><td></td><td>Guatemala</td></tr>
<tr><td>Z. diploperennis</td><td></td><td></td><td rowspan="2">Teosinte perenne</td></tr>
<tr><td>Z. perennis</td><td></td><td></td></tr>
</table>

Celaya. Tuxpeño invadió la costa del golfo y el norte; Vandeño, parte de la costa del Pacífico junto con el otro germoplasma de Oaxaca-Chiapas y Celaya, por fin, se estableció en la región de El Bajío, en la Mesa Central. Este germoplasma del este de México también emigró hacia Guatemala y otros países centroamericanos.

El complejo "Altos de Guatemala" se originó en la región del mismo nombre, de esa república. El germoplasma domesticado emigró hacia el norte, posiblemente una vez que se mezcló con el complejo Zapalote de Oaxaca-Chiapas. También emigró, aunque en menor frecuencia, hacia el sur de América Central.

Cada una de estas domesticaciones se debió prolongar durante algún tiempo, lo que facilitó la formación de poblaciones de maíz con una variación genética cada vez mayor. De ese modo, se "extrajo", a favor del maíz, una gran proporción de la variación genética existente en las poblaciones de teosinte. Además, distintas poblaciones de maíz pudieron originarse a partir de diferentes poblaciones de teosinte, propias de distintas subregiones en cada región, lo que contribuyó a incrementar la variación genética del maíz. En suma, todo parece indicar que la domesticación no se redujo a un evento único y aislado, sino que ocurrió en diferentes momentos y lugares y, posiblemente, mediante la acción de grupos humanos de distintas generaciones.

Conforme el proceso de domesticación avanzaba, el cultivo del maíz se extendió y llegó a predominar en el medio, compitiendo así con el teosinte. (Se desconoce si, en esas circunstancias, el teosinte fue perdiendo la capacidad de originar plantas de maíz, precisamente para mantener su identidad ante la competencia del maíz.) La variación genética de los germoplasmas primigenios de maíz permitió que éstos se diversificaran; merced a su capacidad de adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes, físicas y bióticas, y con la ayuda de la selección del hombre, se promovió el desarrollo de una amplia diversidad racial. En la actualidad se conocen alrededor de 30 razas en México y centenares en el resto del mundo.

Así, la agricultura del maíz se extendió. Contribuyó al incremento de la población que, a su vez, creó la necesidad de ampliar los cultivos. Se establecieron nuevos poblados humanos y el intercambio de bienes entre ellos. De esta forma se explica cómo se desarrollaron las distintas rutas de migración antes descritas. Además, el maíz se cultiva hoy en todo el mundo, bajo condiciones ambientales diversas y en una gran variedad de ecosistemas: desde regiones tropicales hasta latitudes altas de ambos hemisferios y en altitudes que varían de 0 a 4000 metros. Si los germoplasmas primigenios surgieron en centros tropicales de poca altitud del sur de México y también en regiones elevadas (de 2000 a 3000 metros de altitud) del centro de este país, quedaría explicado de qué modo se extendió el cultivo de esta gramínea a todas las regiones agrícolas del mundo, en sólo 500 años.

Domesticación unicéntrica

Además de los nódulos, existen otras estructuras cromosómicas que proporcionan información sobre la evolución del genoma: los micro-

COMPLEJOS DE NODULOS CROMOSOMICOS DEL MAIZ

Para dilucidar si la domesticación del maíz fue unicéntrica (en un lugar determinado) o multicéntrica (en varios lugares), se ha estudiado la distribución de los nódulos cromosómicos en distintas muestras de maíz. Los resultados indican que la distribución geográfica y racial de estos segmentos heterocromáticos responde, en la mayoría de los casos, a uno de los cinco patrones o complejos siguientes de nódulos cromosómicos.

COMPLEJO ZAPALOTE
Presenta nódulos medianos y grandes en la posición 4C2; pequeños, medianos y grandes en la posición 5C1, y medianos y grandes en 7C. Aparece principalmente en las razas Zapalote Chico, Zapalote Grande y Bolita. Se distribuye hacia el norte y el sur de la región de Oaxaca-Chiapas; en las regiones costeras del Pacífico se encuentra sólo en pocas poblaciones de otras razas.

COMPLEJO PEPITILLA
Presenta un nódulo grande en la posición 6L3. Se concentra en las poblaciones de la raza Pepitilla y su emparentada Maíz Ancho, que medran a altitudes intermedias —de 1500 a 1800 metros— en los estados de Morelos, Puebla, Guerrero, México, Michoacán y Guanajuato. Se ha distribuido hacia los estados de Jalisco y Nayarit, y de ahí hacia el noroeste siguiendo hasta el este de los EE.UU.

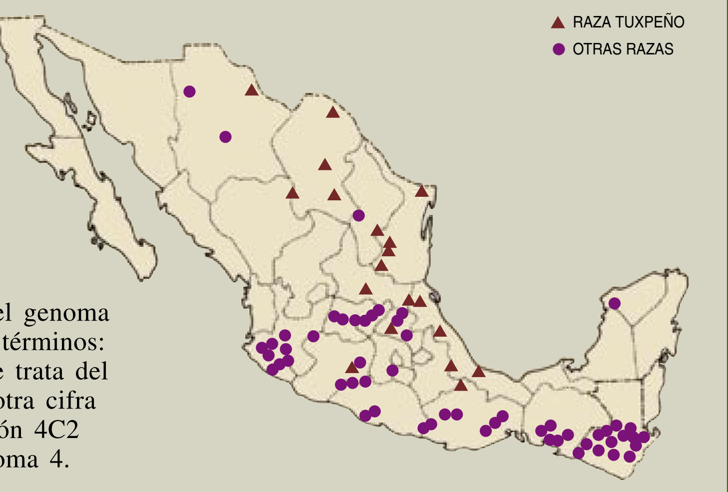


COMPLEJO MESA CENTRAL
Los nódulos pequeños y medianos aparecen en la posición 6L1. Se encuentra en las razas Cónico, Palomero Toluqueño, Arrocillo amarillo y Chalqueño, típicas de la Mesa Central, región elevada del centro de México. También se ha hallado en otras razas que medran en el centro norte del país.

COMPLEJO ALTOS DE GUATEMALA
Presenta una combinación de nódulos pequeños y posiciones con ausencia de nódulos. Se concentra en la región guatemalteca del mismo nombre. Aparece en las razas San Marceño, Serrano, Quicheño, Negro de Chimaltenango y Salpor.



COMPLEJO TUXPEÑO
Presenta un nódulo grande en la posición 9L2. Se encuentra en las razas Tuxpeño, que se distribuye a lo largo de la costa del golfo de México y Vandeño, en la costa del Pacífico, y Celaya, que medra en la región de El Bajío, en la Mesa Central. También se ha hallado en poblaciones de Guatemala, así como de otros países centroamericanos.



El código que se utiliza para describir la posición en el genoma de un elemento morfológico se sirve de los siguientes términos: una cifra (que indica el cromosoma), una letra (*L* si se trata del brazo cromosómico largo y *C* si se trata del corto) y otra cifra (que corresponde al *locus*). Así, por ejemplo, la posición 4C2 se encuentra en el locus 2 del brazo corto del cromosoma 4.

TAKEO ANGEL KATO YAMAKAKE

satélites. Estas pequeñas regiones de ADN contienen múltiples copias de secuencias repetitivas cortas, que permiten rastrear la herencia familiar. A partir del estudio del genotipo de 99 *loci* de microsatélites y medición de la distancia genética ajustada al patrón de mutación que exhiben los microsatélites en muestras de maíz provenientes de diferentes países del continente americano (desde Canadá hasta Chile) y teosinte mexicano y guatemalteco, Yoshihiro Matsuoka, de la Universidad de Wisconsin, y sus colaboradores llevaron a cabo un análisis filogenético cuyos resultados se publicaron en 2002. De acuerdo con estos hallazgos, el origen del maíz fue unicéntrico, surgió en la parte central de la cuenca del río Balsas, en el estado mexicano de Guerrero; y es monofilético, pues derivó del teosinte ssp. *parviglumis* o raza Balsas. Las múltiples razas de maíz que se conocen en la actualidad procederían de la hibridación del maíz domesticado de ssp. *parviglumis* con las razas Chalco y Mesa Central de la ssp. *mexicana*.

Según esta interpretación, el teosinte no habría evolucionado desde que se produjo la domesticación del maíz en Mesoamérica, hace 8000 años. Con otras palabras, la distribución de esta planta no habría cambiado desde tiempos prehistóricos. Esta hipótesis resulta poco verosímil si tenemos en cuenta que se han producido grandes cambios bióticos que deben haber afectado a las plantas del teosinte, especialmente en su adaptación. Una de esas alteraciones es el constante incremento de las áreas agrícolas dedicadas al cultivo del maíz, competidor genético del teosinte, ya que ambas plantas se cruzan con facilidad cuando conviven en los mismos campos. Sobre la descendencia de estos híbridos actúan la selección natural y la artificial, de tal forma que mantienen las diferencias entre las plantas originales y las domesticadas. Si esto es lo que ha sucedido durante 8000 años, entonces se podría suponer que las poblaciones de teosinte capaces de originar maíz presentaban una distribución mucho más extensa que sus representantes actuales.

Otro factor que pudo alterar la distribución de las poblaciones de teosinte y su naturaleza genética en épocas más recientes es la introducción de ganado con la llegada de los conquistadores españoles, en las postrimerías del siglo XV. En los 500 años transcurridos desde entonces, las poblaciones de teosinte posiblemente se han reducido hasta tal punto, que hoy crecen casi exclusivamente junto a los campos de maíz o mezcladas con éstos como una maleza. ¿Es posible que la acción de estos animales domesticados, que no existían antes en Mesoamérica, modificara el genoma de las poblaciones de teosinte? La respuesta probablemente sea afirmativa; pero no podemos demostrarlo, dado que no conocemos cómo eran los teosintes antes de la colonización de estos territorios.

Con todo, Matsuoka y sus colaboradores advierten que la región central de la cuenca del río Balsas debería considerarse una más de las candidatas a albergar el núcleo de esta domesticación supuestamente unicéntirca, pues cabe la posibilidad de encontrar poblaciones de teosinte que muestren mayor parentesco genético con el maíz; además, la distribución moderna de las poblaciones de teosinte podría diferir de la del período de domesticación.

Aun aceptando la raza Balsas como único ancestro, los indicios sobre la evolución del maíz concuerdan también con la propuesta multicéntrica que deriva del análisis de la distribución de los nódulos cromosómicos. Además, a diferencia de la teoría unicéntrica, la hipótesis multicéntrica no necesita recurrir a la introgresión de las razas Chalco y Mesa Central para justificar la gran variación genética del maíz actual; ésta responde a un proceso de domesticación continuo en el tiempo y el espacio.

A modo de conclusión podemos afirmar que, debido a la ausencia de pruebas que indiquen que la distribución de las poblaciones de teosinte y la naturaleza de las mismas haya cambiado en los 8000 años transcurridos desde la domesticación del maíz, así como de indicios que apunten lo contrario, el aceptar si la domesticación del maíz ocurrió de forma unicéntrica o multicéntrica depende de cómo se interprete el pasado evolutivo de las poblaciones de teosinte. En cuanto al número de ancestros, sin embargo, el consenso es mayor: la hipótesis monofilética que propone la raza Balsas como único ancestro goza de amplia aceptación entre los expertos. Con todo, todavía quedan muchas cuestiones por aclarar. Deberemos esperar que los futuros estudios arrojen luz sobre las controversias que subsisten en la actualidad.

El autor

Takeo Angel Kato Yamakake se dedica a la citogenética del género *Zea*. Obtuvo el grado de ingeniero agrónomo en la Escuela Nacional de Agricultura, en el Estado de México. Completó su formación en las universidades estatales de Carolina del Norte y Massachusetts. Hasta 1972 trabajó en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Desde 1975 desarrolla su actividad en el Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, también en el Estado de México.

Bibliografía complementaria

SIGNIFICANCE OF CHROMOSOME CONSTITUTIONS IN TRACING THE ORIGIN AND MIGRATION OF RACES OF MAIZE IN THE AMERICAS. B. McClintock en *Maize Breeding and Genetics*, págs. 159-184. Preparado por David B. Walden. John Wiley; Nueva York, Chichester, Brisbane y Toronto. 1978.

CONSTITUCIÓN CROMOSÓMICA DE LAS RAZAS DE MAÍZ. SU SIGNIFICADO EN LA INTERPRETACIÓN DE RELACIONES ENTRE LAS RAZAS Y VARIEDADES EN LAS AMÉRICAS. B. McClintock, T. A. Kato Y. y A. Blumenschein. Colegio de Postgraduados; Chapingo, México, 1981.

CHROMOSOME MORPHOLOGY AND THE ORIGIN OF MAIZE AND ITS RACES. T. A. Kato Y. en *Evolutionary Biology*, vol. 17, págs. 219-253; 1984.

A SINGLE DOMESTICATION FOR MAIZE SHOWN BY MULTILOCUS MICROSATELLITE GENOTYPING. Y. Matsuoka, Y. Vigouroux, M. M. Goodman, J. J. Sánchez G., E. Buckler y J. Doebley en *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 99, n.º 6, págs. 6080-6084; 30 de abril; 2002.



1. LOS ADORNOS PERSONALES y las pinturas corporales pueden haberse originado mucho antes de lo que se pensaba. Estas pequeñas conchas perforadas de 75.000 años de antigüedad halladas en la cueva sudafricana de Blombos constituyen uno de los primeros indicios de un uso simbólico, componente clave del comportamiento humano moderno.

La aparición de la mente moderna

Ciertos hallazgos polémicos señalan que las raíces de nuestra inteligencia son mucho más profundas en el tiempo de lo que se pensaba

KATE WONG

FRANCESCO D'ERRICO *Universidad de Burdeos*; INSTITUTO DE INVESTIGACION DEL PATRIMONIO AFRICANO Y UNIVERSIDAD DE BERGEN (*conchas perforadas*); RANDY HARRIS (*derecha*)



Ciudad del Cabo, Sudáfrica. Christopher Henshilwood, arqueólogo de la Universidad de Bergen, saca de una pequeña bolsa de plástico una cartulina azul; en ella están fijadas, en tres filas, 19 conchas de caracol de tamaño similar al de un grano de maíz. A primera vista, parecen unas simples conchas de molusco, erosionadas por el paso del tiempo y sin ningún interés especial. Para el experto, en cambio, tienen más valor que cualquier pieza de alta joyería.

Las conchas se hallaron en la cueva de Blombos, a 240 kilómetros al este de Ciudad del Cabo. Tienen todas el mismo tamaño; presentan un orificio en el mismo lugar, en la zona opuesta a la abertura. Según Henshilwood, los humanos de hace 75.000 años las recogieron y perforaron para fabricar un colgante de cuentas brillantes —la versión primitiva de un collar de perlas. Si ello fuera cierto, estas humildes conchas se convertirían en el adorno personal más antiguo hallado hasta la fecha, una verdadera joya de la historia de la humanidad. Además, demostrarían que nuestros antepasados empezaron a desarrollar el simbolismo mucho antes de lo que se pensaba.



2. CONCHAS DE CARACOL recogidas en un estuario situado a 18 kilómetros de la cueva de Blombos y luego perforadas con un punzón de hueso. El desgaste alrededor de los orificios revela que se ensartaron para formar un collar o una pulsera.

FRANCESCO D'ERRICO *Universidad de Burdeos*; INSTITUTO DE INVESTIGACION DEL PATRIMONIO AFRICANO Y UNIVERSIDAD DE BERGEN (*conchas perforadas*); RANDY HARRIS (*derecha*)

La aparición de la conducta humana

El origen de *Homo sapiens*, el humano anatómicamente moderno, suele considerarse un evento exclusivo de Africa. En 2003, se descubrieron en Herto (Etiopía) unos fósiles que demostraron que *H. sapiens* apareció hace unos 160.000 de años. El pasado mes de febrero, se publicaron nuevas dataciones de unos fósiles hallados en Omo Kivis, otro yacimiento etíope, que situaban la aparición de nuestra especie en hace 195.000 años.

La datación del origen de la mente moderna entraña mayor dificultad. Durante los dos últimos decenios, los expertos han sostenido que la humanidad sufrió una revolución comportamental hace alrededor de 40.000 años. Basaban esta hipótesis en la abundancia de restos culturales dejados por los antiguos pobladores del continente europeo. En Europa, el registro arqueológico se divide en dos períodos con marcadas diferencias: el Paleolítico Medio (anterior a los 40.000 años de antigüedad) y el Paleolítico Superior (desde los 40.000 años de antigüedad en adelante).

Según parece, los humanos del Paleolítico Medio seguían empleando el mismo tipo de útiles líticos, relativamente simples, que venían produciendo desde hacía decenas de miles de años. Los del Paleolítico Superior, en cambio, comenzaron a desarrollar toda una variedad de prácticas avanzadas. En un abrir y cerrar de ojos a escala geológica, los humanos que vivían desde el valle del Ródano hasta las llanuras de Rusia empezaron a fabricar armas más refinadas, a tejer redes de intercambio a larga distancia, a expresarse a través del arte y de la música, y a desarrollar un conjunto de actividades que los arqueólogos asocian con la modernidad. Se produjo un gran salto adelante en nuestra evolución.

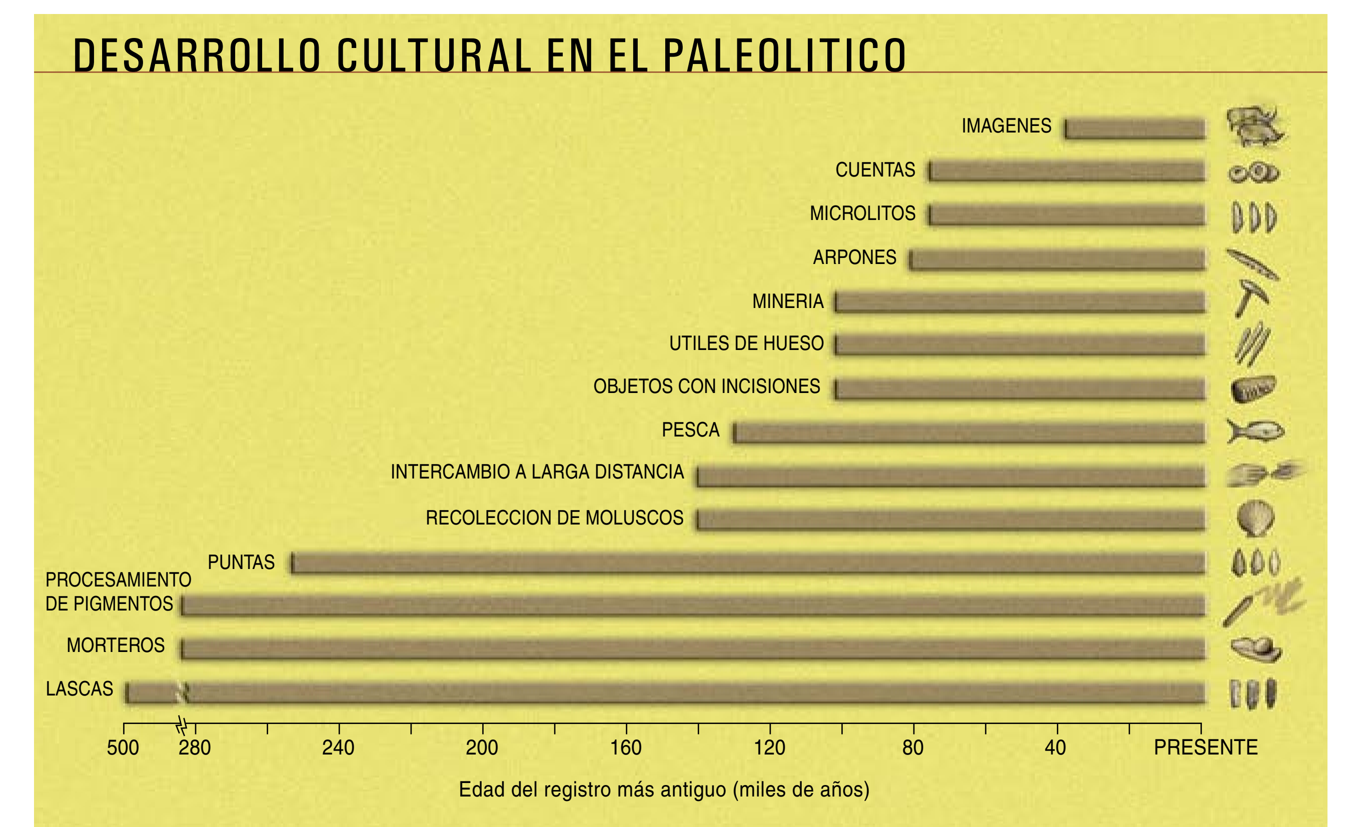
Quizá se trate de una mera coincidencia, pero en el mismo período en que acontecía la transición del Paleolítico Medio al Superior, *H. sapiens* empezó a establecerse en Europa —hasta esa época había sido un territorio exclusivo de los neandertales—. Aunque no se conoce con certeza la identidad de los autores de los artefactos más antiguos del Paleolítico Superior —no se han encontrado fósiles humanos en esos yacimientos—, tradicionalmente se han atribuido a *H. sapiens*, no a neandertales. Algunos expertos plantean la posibilidad de que el encuentro entre estas dos poblaciones despertara en los recién llegados unas habilidades creativas que hasta entonces habían permanecido aletargadas.

Otros opinan que esta explosión cultural europea tuvo sus raíces en una serie de cambios ocurridos en Africa en una época más antigua. Richard G. Klein, de la Universidad de Stanford, sostiene que el cambio abrupto entre el Paleolítico Medio y el Superior refleja el mismo tipo de transición que se vivió en Africa 5000 o 10.000 años antes, al pasar de la Edad de Piedra Media a la Edad de Piedra Tardía. En su opinión, el cambio no se debió al contacto con otro homínido (en esa época, *H. sapiens* era la única especie de homínido que habitaba Africa) sino

Resumen/Origen del pensamiento simbólico

- Creíase que la mente moderna se había adquirido en un proceso rápido y en fecha reciente. Solía remontarse ese episodio unos 50.000 años atrás, es decir, transcurridos más de 100.000 años desde la aparición de *Homo sapiens*.
- Ciertos descubrimientos en Africa señalan que muchos de los elementos propios del comportamiento humano moderno hunden sus raíces en épocas todavía más remotas.
- Los nuevos hallazgos sugieren que nuestra especie contaba con una inteligencia semejante a la nuestra desde el momento de su aparición, pero que explotó su creatividad sólo cuando hacerlo supuso una ventaja evolutiva —en épocas de crecimiento demográfico, por ejemplo.
- *H. sapiens* quizá no sea el único homínido dotado de capacidades cognitivas avanzadas. Algunos restos arqueológicos indican que los neandertales poseían parejas cualidades.

DESARROLLO CULTURAL EN EL PALEOLITICO



En Africa se han hallado indicios de comportamiento humano moderno anteriores a la revolución cultural del Paleolítico Superior que aconteció en Europa hace 40.000 años (*arriba*). Esa fecha, pues, marca un punto de inflexión, a partir del cual *Homo sapiens* emprende, de forma generalizada, el camino de la modernidad. Varias hipótesis se han propuesto para explicar esta transición.

ALISON KENDALL; FUENTE: ACTUALIZADO DE S. MCBREARTY Y A. S. BROOKS EN *JOURNAL OF HUMAN EVOLUTION*, VOL. 39, N.º 5, PAGS. 453-563; NOVIEMBRE 2000

Simbolismo. Según Christopher Henshilwood, de la Universidad de Bergen, la utilización de "depósitos" externos de información (ya sean adornos, manifestaciones artísticas, lenguaje o útiles) constituye un paso crucial en la evolución del comportamiento humano. Probablemente, *Homo sapiens* poseía las bases anatómicas necesarias para desarrollar un pensamiento simbólico desde su aparición, hace al menos 195.000 años. Ello explicaría que, de forma ocasional, se entrevean algunos de estos comportamientos en el registro arqueológico. El pleno desarrollo del simbolismo llegó cuando éste se convirtió en elemento esencial del comportamiento humano —época en que se formaron alianzas y redes de intercambio comercial.

Catástrofe ecológica. Los datos paleogenéticos indican que *H. sapiens* experimentó un "cuello de botella" evolutivo hace alrededor de 70.000 años. Stanley H. Ambrose, de la Universidad de Illinois, sostiene que este suceso podría guardar relación con la erupción del volcán del Monte Toba (Sumatra), que en esa misma época habría provocado un invierno volcánico de seis años de duración, al que siguieron unos 1000 años de glaciación. Los individuos que cooperaron y compartieron recursos más allá de los límites de su grupo local fueron los mejor preparados para superar las hostilidades del medio y pasar, por tanto, sus genes a la siguiente generación. Estas condiciones extremas favorecieron cambios en la organización social: de los grupos dispersos a la asociación en tribu.

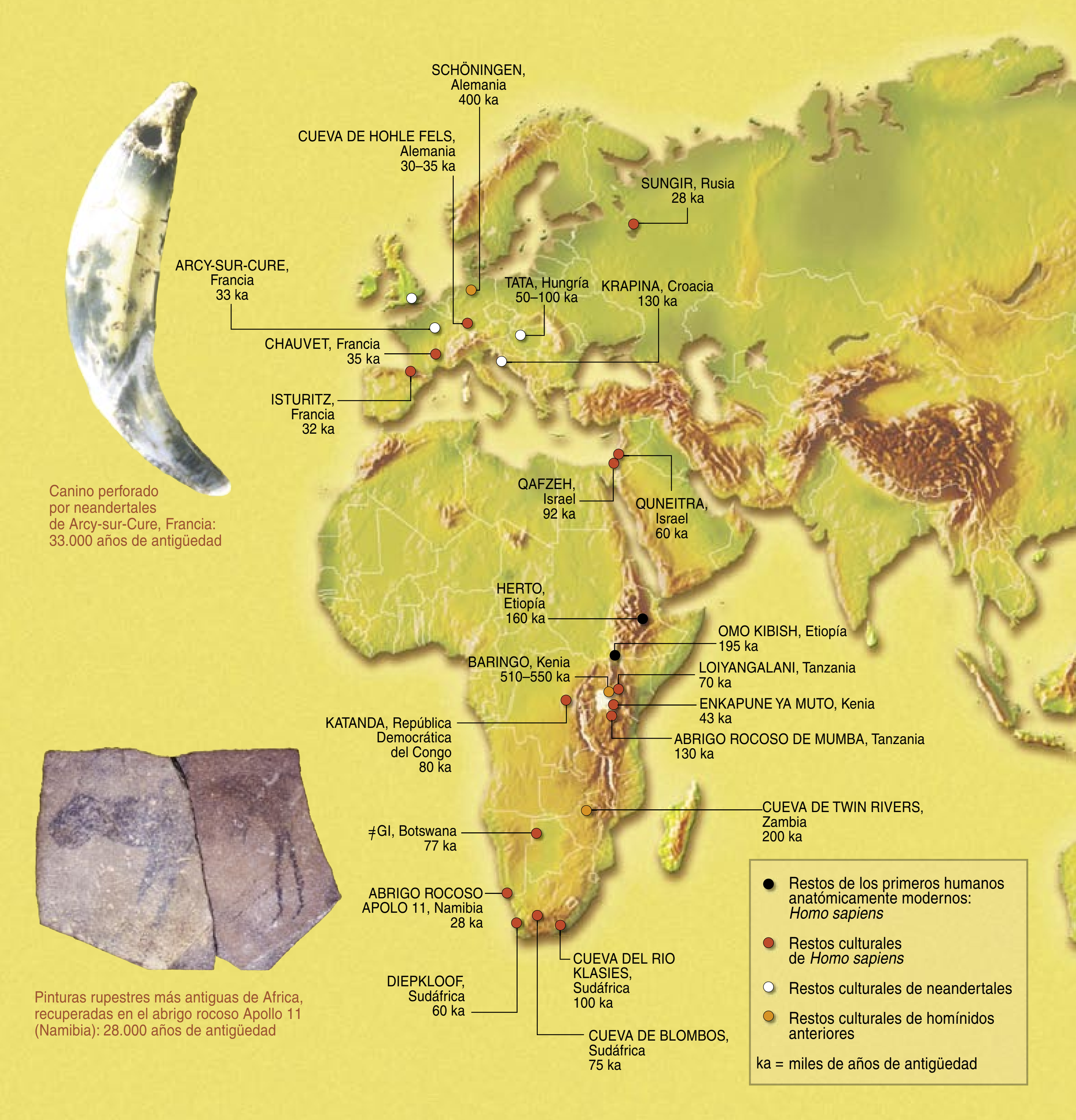
Fabricación de proyectiles. Las armas a distancia, que empezaron a fabricarse hace entre 45.000 y 35.000 años, permitieron a los humanos abatir presas mayores, así como a otros humanos, desde una distancia más segura. Según John Shea, ello fomentó la cooperación entre individuos, que a su vez propició la formación de redes sociales en las que el intercambio de información era más eficaz.

Crecimiento demográfico. Los comportamientos de tipo moderno aparecieron y desaparecieron en diferentes momentos y lugares hasta que la población adquirió un tamaño crítico. A partir de entonces, el enfrentamiento entre grupos y la competencia por los recursos desencadenaron el desarrollo del simbolismo y estimularon la creatividad. Esta es la tesis de Alison Brooks, de la Universidad George Washington, Sally McBrearty, de la Universidad de Connecticut, y otros expertos. Además, al aumentar el número de individuos que participaban en la transmisión de la información, las tradiciones empezaron a arraigarse, ya que no se extinguían con el último superviviente de un grupo.

Mutación cerebral. Según Richard Klein, de la Universidad de Stanford, hace alrededor de 50.000 años se produjo una mutación genética que reconfiguró las conexiones del cerebro humano, capacitándolo para el pensamiento simbólico, lenguaje incluido. Los humanos que heredaron esta mutación contaban con una considerable ventaja sobre los demás en la lucha por los recursos; terminaron por reemplazarlos.

Cartografía de la modernidad

Los fósiles de *Homo sapiens* hallados en el yacimiento de Omo Kibish (Etiopía) señalan que hace 195.000 años aparecieron unos humanos con una anatomía igual a la nuestra. El comportamiento moderno, en cambio, tardaría 150.000 años más en aparecer. Esto es lo que se venía infiriendo de los restos culturales recuperados en los yacimientos europeos: manifestaciones artísticas, rituales, innovaciones técnicas y otros indicios de comportamiento avanzado abundan en este continente desde hace 40.000 años, coincidiendo en el tiempo con la llegada de los humanos anatómicamente modernos. Pero los hallazgos recientes en la cueva sudafricana de Blombos y en otros yacimientos fuera de Europa señalan que muchas de estas prácticas avanzadas surgieron hace más de 40.000 años. Así pues, los humanos habrían adquirido las capacidades cognitivas modernas en el mismo momento en que fueron dotados de una anatomía moderna —si no antes. El hecho de que algunos neandertales mostraran, según parece, comportamientos simbólicos abre la posibilidad de que estas capacidades cognitivas estuvieran presentes en el último antepasado común de neandertales y *Homo sapiens*. En el mapa se sitúan los yacimientos mencionados en el artículo.



Canino perforado por neandertales de Arcy-sur-Cure, Francia: 33.000 años de antigüedad

Pinturas rupestres más antiguas de Africa, recuperadas en el abrigo rocoso Apollo 11 (Namibia): 28.000 años de antigüedad



Ave acuática tallada en marfil, una de las piezas de arte figurativo más antiguas; procede de la cueva de Hohle Fels, Alemania: 30.000-35.000 años de antigüedad

Fragmento de ocre rojo calentado y raspado, posiblemente utilizado en algún ritual funerario; hallado en la cueva de Qafzeh (Israel): 92.000 años de antigüedad

Arpón de hueso hallado en Katanda (República Democrática del Congo): 80.000 años de antigüedad

Cuenta de cáscara de huevo de avestruz procedente de Loiyangalani (Tanzania): 40.000-200.000 años de antigüedad

LUCY READING-IKKANDA (*mapa*); RANDALL WHITE *Universidad de Nueva York* (*canino perforado*); GERALD NEWLANDS (*Pintura de Apollo 11*); HILDE JENSEN *Universidad de Tübingen* (*ave acuática tallada en marfil*); GAVRIEL LARON Y ERELLA HOVERS *Instituto de Arqueología, Universidad Hebrea de Jerusalén* (*ocre rojo*); CHIP CLARK *Museo Nacional de Historia Natural* (*arpón de hueso*); UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA (*cuenta de cáscara de huevo*)

a una mutación génica ocurrida hace 50.000 años, que afectó al sistema neurológico y favoreció el desarrollo de nuestra creatividad.

La prueba que ofrece mayor respaldo a la hipótesis de Klein procede de Enkapune Ya Muto (“cueva de la penumbra”), un yacimiento en el centro de Kenia: sitúa el origen de la Edad de Piedra Tardía entre hace 45.000 y 50.000 años. En este yacimiento, el grupo de Stanley H. Ambrose, de la Universidad de Illinois, ha descubierto cuchillos de obsidiana, raspadores del tamaño de la uña del pulgar y pequeñas cuentas discoidales, elaboradas con cáscara de huevo de avestruz. Estos objetos proceden de niveles atribuidos a la Edad de Piedra Tardía, de 43.000 años de antigüedad. Los actuales pueblos de cazadores y recolectores ¡kung san de Botswana intercambian todavía este tipo de abalorios. Ambrose opina que los humanos que fabricaron las cuentas halladas en Enkapune Ya Muto lo hicieron por la misma razón: fomentar buenas relaciones con grupos vecinos con el pensamiento puesto en los tiempos difíciles. Según Klein, esta capacidad (transmitida genéticamente) de comunicarse a través de símbolos, junto con una habilidad cognitiva que permitía mejorar las técnicas de caza y el aprovechamiento de los recursos, impulsó a nuestra especie, 150.000 años después de su origen biológico, a abandonar por fin el continente africano y conquistar el planeta.

Semillas de cambio

No obstante, en los últimos años está creciendo el número de arqueólogos que rechazan las teorías basadas en una suerte de eclosión instantánea de la cultura (la “gran explosión” cultural). Proponen un modelo diferente. En su opinión, no existió hiato temporal entre el desarrollo del cuerpo y el del cerebro. El comportamiento humano moderno habría surgido en el transcurso de un largo período, en un proceso que guardó mayor semejanza con una evolución gradual que con una revolución. Algunos sostienen incluso que el desarrollo cognitivo pudo haber surgido también en los neandertales, otra especie de homínido.

La idea de que nuestra incomparable inteligencia tuviera raíces primigenias no constituye ninguna novedad. Desde hace tiempo, se conoce la existencia de una serie de objetos que sugieren que los humanos ya habían adquirido prácticas modernas mucho antes de que *H. sapiens* realizase las primeras pinturas rupestres en Europa. Estos restos incluyen tres lanzas de madera de 400.000 años de antigüedad halladas en Schöningen, una posible figurilla de 233.000 años de antigüedad procedente de Berekhat Ram (Israel), un pequeño fragmento de sílex con tres arcos concéntricos grabados de 60.000 años de antigüedad hallado en Quneitra (Israel), dos fragmentos de hueso de 100.000 años de antigüedad con algunas muescas recuperados en una cueva de la desembocadura del río Klasies, en Sudáfrica, y un fragmento pulido de un diente de mamut hallado en Tata (Hungría) de entre 100.000 y 50.000 años de antigüedad. Aun así, muchos arqueólogos se resistían a aceptar que estos hallazgos probaran un comportamiento moderno; aducían que o bien la antigüedad o el significado de los objetos no quedaban claros. Cualquier signo de inteligencia avan-

zada en una cronología tan remota se consideraba una excepción, producto de algún genio entre individuos menos evolucionados.

Una interpretación que resulta cada vez más difícil de defender. Aumenta en Africa el número de hallazgos que prueban que la metamorfosis cultural fue anterior a la Edad de Piedra Tardía. En un artículo de 2000, Sally McBrearty, de la Universidad de Connecticut, y Alison S. Brooks, de la Universidad George Washington, expusieron su argumentación: gran parte de los componentes del comportamiento humano moderno que se pensaba que emergieron hace entre 50.000 y 40.000 años se observan en el registro arqueológico decenas de miles de años antes, en las poblaciones de la Edad de Piedra Media. Además, no aparecen de forma conjunta, sino dispersa, en yacimientos muy distanciados geográfica y cronológicamente.

En tres yacimientos de Katanda (República Democrática del Congo), Brooks y John Yellen, de la Institución Smithsoniana, han encontrado arpones dentados y trabajados en hueso, de 80.000 años de antigüedad como mínimo (en plena Edad de Piedra Media). El grado de elaboración de estos artefactos es comparable con el de los arpones hallados en Europa, de 25.000 años de antigüedad. Comparten no sólo la complejidad del diseño del proyectil, sino también el material usado. (Se asumía que la utilización sistemática de hueso y marfil en la fabricación de útiles no se había adoptado hasta la Edad de Piedra Tardía y el Paleolítico Superior.) Junto con los arpones se han encontrado restos de siluro gigante del Nilo; ello indica que los humanos habitaron ese lugar en el momento de desove de los peces. (Antaño, este tipo de aprovechamiento estacional de los recursos se reservaba a humanos posteriores.)

En otros yacimientos de la Edad de Piedra Media, como el ≠Gi (el símbolo "≠" indica un chasquido de lengua) en el desierto de Kalahari, de 77.000 años de antigüedad, se han recuperado restos de animales sacrificados que ponen en entredicho la hipótesis de que estos antiguos pobladores no habían adquirido la destreza en la caza que mostraron quienes vivieron durante la Edad de Piedra Tardía. Parece que los habitantes de ≠Gi cazaban cebras, jabalíes verrugosos y otras presas de gran tamaño difíciles de abatir. Hilary J. Deacon, de la Universidad Stellenbosch, señala que en otros yacimientos, como el de la desembocadura del río Klasies (Sudáfrica), existen pruebas de que hace 60.000 años los humanos incendiaban las praderas deliberadamente para favorecer el crecimiento de los tubérculos nutritivos (sabían, por tanto, que éstos germinan tras quedar expuestos a la acción del fuego).

Algunos descubrimientos indican que ciertos aspectos considerados propios del comportamiento moderno aparecieron antes de la emergencia de *Homo sapiens*. Durante el verano de 2004, el equipo de McBrearty excavó en un yacimiento próximo al lago Baringo (Kenia): encontraron unas lajas de piedra —útiles considerados distintivos de las culturas del Paleolítico Superior— de hace unos 510.000 años. En un yacimiento cercano, en niveles que datan de 285.000 años de antigüedad, hallaron también grandes cantidades de ocre rojo (un mineral de óxido de hierro) y morteros para procesarlo. En la opinión de McBrearty, estos restos demuestran que, durante la Edad de Piedra Media, los pobladores de Baringo empleaban pigmentos con finalidades simbólicas (para decorar su cuerpo, por ejemplo), de la misma forma que los humanos modernos.

Pero Baringo no es el único yacimiento que ha proporcionado datos sorprendentemente antiguos del procesado del ocre. En la cueva de Twin Rivers (Zambia) se han encontrado también materiales similares, de más de 200.000 años de antigüedad. Los conjuntos líticos de 130.000 años de antigüedad desenterrados en el abrigo rocoso de Mumba (Tanzania) incluyen lascas de obsidiana procedentes de un afloramiento volcánico situado a 300 kilómetros del yacimiento. Ello sugiere que los humanos que los fabricaron consiguieron la exótica materia prima a través del intercambio con otros grupos.

Sin embargo, algunos expertos cuestionan la atribución de un significado simbólico a estos hallazgos y ponen en duda la datación asignada. El ocre, por ejemplo, pudo haber sido utilizado no con fines decorativos sino para enmangar en madera los útiles líticos o eliminar los microbios en el tratamiento de las pieles de animales.

El tesoro arqueológico de Blombos

Los hallazgos de Blombos han venido a arrojar nueva luz sobre esta vieja polémica. En 1991, mientras buscaba yacimientos de cazadores-recolectores de una época posterior para la realización de su tesis doctoral, Henshilwood descubrió el yacimiento arqueológico de la cueva de Blombos. Se encuentra ésta en un acantilado sobre el océano Indico, cerca de Still Bay, población de la región sudafricana del Cabo meridional. Aunque contenía muy pocos artefactos del Holoceno —que Henshilwood andaba buscando—, Blombos abundaba en útiles de la Edad de Piedra Media. Aquellos restos quedaron fuera de su investigación hasta que en 1997 consiguió financiación para emprender una excavación sistemática. Desde entonces, Henshilwood y su equipo han recuperado un conjunto impresionante de útiles líticos refinados y objetos simbólicos. Con todo ello, han esbozado una imagen de unos antepasados que debieron pensar de forma similar a la nuestra.



3. FRAGMENTO DE OCRE de Blombos, grabado con un punzón de piedra. Podría responder a un sistema de anotación o a una finalidad estética.

CHAD HENNING; *Instituto de Investigación del Patrimonio Africano y Universidad de Bergen*



4. LA CUEVA DE BLOMBOS debió ser un verdadero paraíso para los humanos que vivieron en ella hace 75.000 años. Varios manantiales de agua dulce murmuran a los pies del acantilado; el mar ofrece sus frutos a poca distancia de la cueva. Elands y otros antílopes frecuentaban la zona. El clima era tan suave como el actual.

CHRISTOPHER S. HENSHILWOOD *Instituto de Investigación del Patrimonio Africano y Universidad de Bergen*

En niveles de 75.000 años de antigüedad se ha recuperado un gran número de herramientas avanzadas: 40 útiles de hueso, entre los que destacan unos punzones de delicada elaboración y centenares de puntas bifaciales construidas en silcreta y otras piedras difíciles de tallar. A tenor de su tamaño (algunas de ellas de unos pocos centímetros de longitud), estas puntas debieron usarse como proyectiles para cazar antílopes y otros animales que merodeaban en la zona. Los restos de varias especies de peces de aguas profundas (algunas de hasta más de 130.000 años de antigüedad) señalan que los humanos de Blombos disponían de las artes y el conocimiento necesarios para pescar peces de más de 35 kilos.

La presencia de hogares para cocinar indica que vivían en la cueva. Los dientes de varios adultos y niños ponen de manifiesto que un grupo familiar tuvo allí su morada. La abundancia y calidad de puntas líticas sugiere la posibilidad de que en la cueva hubiera un taller de construcción de herramientas, en donde los maestros instruían a los jóvenes.

Se transmitirían también otras tradiciones, sin duda. Los objetos más espectaculares hallados en Blombos son los que demuestran que sus pobladores estaban dotados de pensamiento simbólico. Hasta la fecha, se han recuperado un fragmento de hueso con incisiones, nueve plaquetas de ocre rojo posiblemente grabadas y docenas de pequeñas cuentas —todo ello en el mismo horizonte de 75.000 años de antigüedad que albergaba los útiles líticos—. Además, los sedimentos de 130.000 años de antigüedad contienen grandes cantidades de ocre procesado, alguno en forma de lápiz.

Quizá nunca se sepa con exactitud qué significado tenían esos enigmáticos grabados para sus autores. Francesco d'Errico, de la Universidad de Burdeos, ha realizado un estudio detallado de dos de los ocres grabados. Ha descubierto que estas piedras de color rojizo fueron pulidas en uno de sus lados para obtener una superficie plana, que luego se grabó con un puntero de piedra. En el fragmento de ocre de mayor tamaño se observan unas líneas muy profundas alrededor de un diseño de líneas entrecruzadas.

La fabricación de las cuentas requería una dedicación trabajosa. Según Henshilwood, las conchas marinas, que pertenecen a la especie de caracol *Nassarius kraussianus*, se recogieron en alguno de los dos estuarios que se encuentran a unos 20 kilómetros de distancia de la cueva y existen hoy todavía. Fueron perforadas utilizando una punta de piedra, introduciéndola por el borde y presionando desde el interior hacia fuera —técnica que requiere una cierta práctica, como han podido comprobar los propios arqueólogos al intentar reproducirla—. El desgaste alrededor de los orificios indica que, una vez perforadas, las cuentas fueron ensartadas en alguna cuerda. Los restos de ocre rojo en las conchas sugieren un posible contacto con la piel de individuos pintados con ese pigmento.

McBrearty opina que los hallazgos de Blombos constituyen una prueba definitiva del desarrollo de las capacidades cognitivas de los humanos durante la Edad de Piedra Media. Pero no todos los expertos apoyan esta tesis. Randall White, de la Universidad de Nueva York, especialista en adornos corporales del Paleolítico Superior, sostiene que las perforaciones y el desgaste son el resultado de procesos naturales y no de la manufactura humana.

Argumentación demográfica

Según Henshilwood, los hallazgos de Blombos demuestran que al menos un grupo de humanos poseía facultades mentales de corte moderno hace más de 50.000 años. Otros objetos señalan también comportamientos modernos precoces: por ejemplo, los fragmentos de cáscara de huevo de avestruz con grabados de unos 60.000 años de antigüedad hallados en el yacimiento de Diepkloof, en la provincia sudafricana del Cabo occidental, o las cuentas de huevo de avestruz de alrededor de 70.000 años de antigüedad desenterradas en el yacimiento tanzano de Loiyangalani.

Al margen de estas pruebas, la polémica sigue abierta: la mayoría de los yacimientos de la Edad de Piedra Media no muestra ninguno de los rasgos que denotan un desarrollo cognitivo pleno. En otros yacimientos de Sudáfrica se han hallado también puntas bifaciales muy elaboradas, pero ningún indicio de pensamiento simbólico. Por supuesto, la ausencia de pruebas no constituye una prueba de ausencia. Quizá los pobladores de estas cuevas sí producían objetos artísticos y se adornaban el cuerpo, pero se han conservado sólo los útiles líticos.

Tal vez el patrón observado en el registro arqueológico africano (escasez de pruebas de capacidades cognitivas modernas anteriores al comienzo de la Edad de Piedra Tardía y abundancia de las mismas en etapas posteriores), se deba a unas adversas condiciones de conservación de los objetos o al restringido número de yacimientos excavados hasta la fecha. Pero podría ser también que estas discontinuidades respondieran a un escenario en el que *H. sapiens* poseía, ya desde su aparición, la capacidad para desarrollar un comportamiento moderno, pero sólo la explotó cuando le proporcionó una ventaja evolutiva. Esta es la hipótesis que sostienen muchos gradualistas.

McBrearty y otros creen que los factores que provocaron el desarrollo cultural guardan una estrecha relación con el aumento de la población. Al crecer el número de individuos se acentuó la lucha por los recursos, forzando a nuestros antepasados a inventar nuevas formas de obtener comida y a recurrir a otros materiales con que elaborar sus útiles. Además, cuanto más numerosa es una población, mayor es la posibilidad de establecer contacto con otros grupos. Las cuentas, las pinturas corporales y quizá también cierto refinamiento en la elaboración de útiles pudieron significar la pertenencia a un grupo y la posición jerárquica dentro del mismo; ello habría resultado provechoso para hacerse con recursos que escaseaban. Los objetos simbólicos pudieron también servir para apaciguar las tensiones sociales; ésta es la función que se atribuye a las cuentas halladas en Enkapune Ya Muto.

Para encontrar un buen socio, conviene mantener relaciones amigables con otros grupos: por ejemplo, mediante una red de intercambio de obsequios. Ello explicaría por qué algunos de los útiles hallados en Blombos muestran tal refinamiento estético. La belleza de un arma no tiene nada que ver con su eficacia, sino con su función simbólica.

Cuando la población disminuye, en cambio, algunas de estas prácticas desaparecen. Quizá porque mueren los individuos que las realizaban o porque, en ausencia de competencia, no suponen ningún beneficio y, por tanto, se abandonan.

Los tasmanos ofrecen un buen ejemplo de este tipo de pérdida cultural. Cuando los europeos llegaron a la región en el siglo XVII, se encontraron con pueblos cuya cultura material era más simple que la del Paleolítico Medio: se basaba en poco más que lascas de piedra, pequeñas y elementales. Tales objetos no pueden considerarse indicios de comportamiento moderno. Sin embargo, el registro arqueológico muestra que, hace algunos miles de años, los tasmanos poseían una cultura técnica más avanzada, que incluía útiles óseos, redes de pesca, arcos y flechas. Parece que los primeros pobladores de Tasmania contaban con todos estos artilugios hasta que, hace 10.000 años, subió el nivel del mar, que aisló del continente al territorio. Al quedar incomunicados con el resto de aborígenes australianos, los tasmanos habrían perdido sus conocimientos técnicos.

Al descenso demográfico podría deberse, pues, la escasez de restos de comportamiento moderno en los yacimientos sudafricanos de hace entre 60.000 y 30.000 años. Las reconstrucciones demográficas sugieren que, hace alrededor de 60.000 años, la población de Africa sufrió un colapso debido a un repentino descenso de la temperatura. Con todo, el desarrollo cognitivo de una población no puede inferirse sólo de lo que produce. Que los humanos que vivieron durante la Edad Media no viajaran a la Luna no significa que carecieran de la capacidad mental para hacerlo.



5. UTILES HALLADOS EN BLOMBOS, mucho más avanzados que los que suelen encontrarse en yacimientos de la Edad de Piedra Media. Entre las herramientas de hueso destacan punzones afilados y pulidos con ocre para obtener una superficie suave.

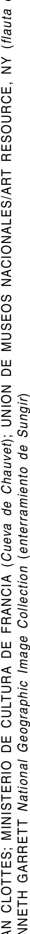
HARRY TYLER; *Instituto de Investigación del Patrimonio Africano y Universidad de Bergen*

Mentalidad simbólica

¿Cuándo, dónde y cómo adquirieron nuestros antepasados capacidades cognitivas modernas? Para responder a estas cuestiones, los expertos deben antes ponerse de acuerdo en la definición del "comportamiento humano moderno". En el sentido más estricto, la expresión comprende cualquier aspecto de la cultura actual: desde la agricultura a las agendas digitales. Sin embargo, muchos arqueólogos recurren a una definición más pragmática, basada en los rasgos conductuales que distinguen en Europa el Paleolítico Medio del Paleolítico Superior. Otros toman como referencia la cultura material de los cazadores recolectores actuales. En última instancia, pues, el veredicto de si unos restos arqueológicos constituyen o no vestigios de un comportamiento moderno dependerá del criterio seguido por el investigador.

Centrémonos en una de las características más importantes del comportamiento moderno: el simbolismo. La capacidad de transmitir símbolos constituye la clave de nuestra vida social; un rasgo característico, si no definitorio, de la mente humana actual.

¿Cuándo aparecieron las primeras manifestaciones de la cultura simbólica? Algunos descubrimientos fuera de Africa y Europa arrojan luz sobre esta cuestión. Polémicos hallazgos en los abrigos rocosos de Malakunanja II y Nauwalabila I (Australia septentrional) señalan que los humanos llegaron a este continente hace 60.000 años. Para emigrar del sudeste asiático, estos pobladores debieron construir barcas robustas y navegar un mínimo de 80 kilómetros en mar abierto. Cualquier humano capaz









6. RESTOS DEL SIMBOLISMO PRIMITIVO abundan en el registro arqueológico europeo. La cueva de Chauvet, en la región francesa de Ardèche, contiene el conjunto de pintura rupestre más antiguo del mundo. En sus galerías se ha encontrado una colección de imágenes de animales de época glacial: por ejemplo, leones dibujados con ocre de 35.000 años de antigüedad (*arriba a la izquierda*). La sensibilidad musical ya se manifestó en los primeros *Homo sapiens* europeos; así lo demuestra la flauta de hueso de 32.000 años de antigüedad hallada en Isturitz, Francia (*sobre estas líneas*). También enterraban a sus muertos siguiendo ritos funerarios. En Sungir (Rusia) se halló un enterramiento de 28.000 años de antigüedad (*arriba a la derecha*, reproducción) de dos niños; junto a los esqueletos aparecieron miles de cuentas y otros objetos rituales.

de llevar a cabo tamaña empresa puede considerarse completamente moderno. En la cueva de Qafzeh (Israel), Erella Hovers, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, y su equipo han recuperado decenas de fragmentos de ocre rojo en unos enterramientos de *H. sapiens* de 92.000 años de antigüedad. Piensan que estos pigmentos fueron calentados al fuego para conseguir un tono escarlata específico y usados luego en ritos funerarios.

Otros hallazgos plantean la duda de que el simbolismo deba reservarse a *H. sapiens*. Los yacimientos de neandertales suelen albergar restos de un procesamiento sistemático del ocre. Hacia el final de su presencia en Europa, poco antes de su extinción y en los albores del Paleolítico Superior, parece que los neandertales desarrollaron una cultura propia de elaboración de adornos personales. Dientes perforados y otros objetos simbólicos se han hallado en los yacimientos neandertales de Quinçay y la Grotte du Renne en Arcy-sur-Cure [*véase* "¿Quiénes fueron los neandertales?", por Kate Wong, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2000]. Los neandertales enterraban a sus muertos, pero la naturaleza simbólica de este comportamiento es todavía motivo de discusión, pues en las tumbas no se han encontrado objetos rituales. Sin embargo, el análisis microscópico de la superficie de unos fósiles desenterrados en la croata Krapina, realizado por Jill Cook, del Museo Británico, abona la hipótesis de que los neandertales limpiaban los huesos de sus muertos; las marcas halladas en los huesos indican que no habían sido descarnados para obtener comida sino para algún ritual funerario.

Quizá la capacidad de pensar de forma simbólica se desarrollara independientemente en los neandertales y en los humanos anatómicamente modernos. Es posible también que surgiera en su antepasado común, antes de que ambos grupos se separasen en dos líneas evolutivas distintas. En opinión de Henshilwood, el origen del pensamiento simbólico se encuentra en la Edad de Piedra Media. El y su equipo prosiguen las campañas de excavación en Blombos. Se centran ahora en los depósitos de 75.000 años de antigüedad, en busca de otros yacimientos que arrojen nueva luz sobre el origen de la mente moderna.

Bibliografía complementaria

THE REVOLUTION THAT WASN'T: A NEW INTERPRETATION OF THE ORIGIN OF MODERN HUMAN BEHAVIOR. Sally McBrearty y Alison S. Brooks en *Journal of Human Evolution*, vol. 39, n.º 5, páginas 453-563; noviembre, 2000.

EMERGENCE OF MODERN HUMAN BEHAVIOR: MIDDLE STONE AGE ENGRAVINGS FROM SOUTH AFRICA. Christopher S. Henshilwood et al. en *Science*, vol. 295, págs. 1278-1280; 15 de febrero, 2002.

THE DAWN OF HUMAN CULTURE. Richard G. Klein, con Blake Edgar. John Wiley and Sons, 2002.

THE INVISIBLE FRONTIER: A MULTIPLE SPECIES MODEL FOR THE ORIGIN OF BEHAVIORAL MODERNITY. Francesco d'Errico en *Evolutionary Anthropology*, vol. 12, n.º 4, págs. 188-202; 5 de agosto, 2003.

THE ORIGIN OF MODERN HUMAN BEHAVIOR: CRITIQUE OF THE MODELS AND THEIR TEST IMPLICATIONS. Christopher S. Henshilwood y Curtis W. Marean en *Current Anthropology*, vol. 44, n.º 5, págs. 627-651; diciembre 2003.

PREHISTORIC ART: THE SYMBOLIC JOURNEY OF HUMANKIND. Randall White. Harry N. Abrams, 2003.

NASSARIUS KRAUSSIANUS SHELL BEADS FROM BLOMBOS CAVE: EVIDENCE FOR SYMBOLIC BEHAVIOR IN THE MIDDLE STONE AGE. Francesco d'Errico, Christopher Henshilwood, Marian Vanhaeren y Karen van Niekerk en *Journal of Human Evolution*, vol. 48, n.º 1, páginas 3-24; enero, 2005.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Castillos de arena húmeda

Estamos en agosto. Ante nosotros, la arena de la playa, limpia por obra de la naturaleza... o de los empleados municipales. Todos, grandes y chicos, se transforman en constructores. ¿Por qué trabajan sólo con arena húmeda? Por la cohesión de este maravilloso material de construcción de obras efímeras. Examinemos sus asombrosas particularidades; así sabremos apisonar bien nuestra arena y explicar por qué los castillos se sostienen mejor con arena mojada por el agua salada.

Dejemos fluir un puñado de arena seca: sobre el suelo formará un montículo cónico. Si añadimos otro puñado, los granos nuevos crearán un arroyuelo que discurre por el declive del montón. Estas propiedades recuerdan a las de un líquido, pero la arena seca posee también propiedades de materia sólida: soporta nuestro peso cuando caminamos por la playa.

Pendiente crítica

Esa dualidad líquido-sólido es peculiar de los materiales granulares: la grava, el azúcar en polvo, etc. Los granos de arena son el producto casi final de la erosión de los continentes. En una playa, están hechos de sílice cristalizada (cuarzo) y su tamaño varía de 20 micras a 2 milímetros.

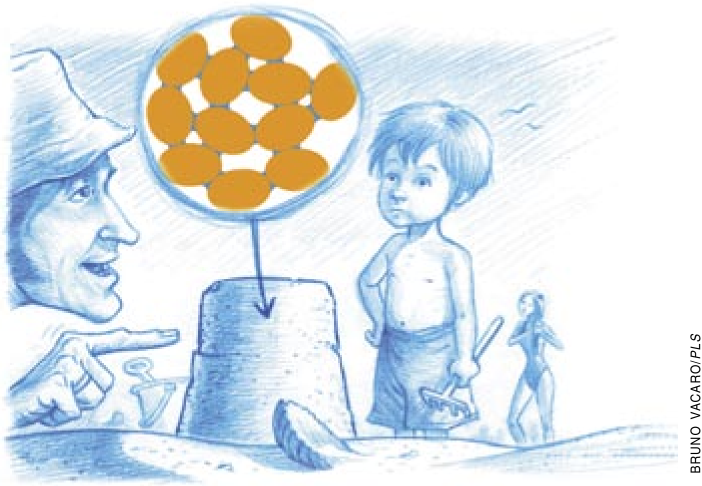
Un montón de arena seca estabilizado no fluye, pues los rozamientos entre los granos impiden que se hunda bajo su propio peso. Sin embargo, en cuanto su pendiente alcanza un valor crítico, la arena vuelve a ser como un líquido en la superficie, aniquilando las esperanzas de los edificadores. La situación de un grano de arena es similar a la de un guijarro sobre un plano inclinado. Mientras la pendiente es suave, el frotamiento del guijarro con la tabla lo sujeta; cuando la pendiente es mayor, el guijarro se desliza o rueda. Si se toma en cuenta la caída de un solo grano, parecerá que la rugosidad de los granos que estén en contacto con él basta para mantenerlo inmóvil. Sin embargo, cada uno de los granos gravita sobre los granos vecinos y ejerce fuerzas laterales que tienden a hacer rodar los granos por una pronunciada pendiente.

Sobrepasada la pendiente crítica, la estructura del montón se vuelve inestable: algún grano de la superficie del montón no está suficientemente retenido por los otros, rueda pendiente abajo, arrastra a los vecinos en su caída y desencadena un alud. Este elimina los granos inestables de las zonas de fuerte pendiente, la cual retorna a un valor inferior al crítico, que es del orden de 30 grados. Así, las arenas marinas erosionadas por la abrasión de las olas están constituidas por granos más o menos ovoides, que forman pendientes menores que las arenas de los ríos, menos desgastadas y, por ello, más rugosas.

¿Cómo se rebasa la pendiente crítica? Para cohesionar los granos, lo más sencillo es mojarlos. En poca cantidad, el agua se aloja en los intersticios más estrechos; entre las moléculas de agua, por una parte, y entre las moléculas de agua y las moléculas de sílice, por otra, se desarrollan unas fuerzas atractivas de corto alcance, las fuerzas de Van der Waals. Por esa causa, el agua tiende a recubrir al máximo la superficie de la sílice, pero permaneciendo lo más compacta posible, de modo que la superficie de contacto con el aire sea mínima. Estos dos efectos conjugados explican no sólo la preferencia



1. Los materiales granulares pueden fluir como los líquidos y forman pilas cónicas con un ángulo próximo a los 30 grados.



BRUNO VACARO/*PLS*

2. La cohesión de la arena húmeda es resultado de los puentes de agua que laxamente unen los granos contiguos.



3. Los granos de arena se agolpan en torno a la zona comprimida por el pie, el agua desciende en el volumen así liberado y la superficie pierde agua.

de las gotas de agua por las cavidades estrechas, sino también la forma de los "puentes de agua" entre los granos. Con lupa, se ve que adquieren la forma de tubos minúsculos, con bases anchas en contacto con la sílice y un vientre delgado en contacto con el aire.

Así, las gotitas de agua intersticial hacen las veces de puntos de cola que mantienen sutilmente unidos los granos. Para precisar la naturaleza de estas uniones, examinemos el caso de un grano aproximadamente esférico suspendido de otro semejante por un puente de agua. El agua de la gota atrae la sílice y una fuerza, la fuerza capilar, dirigida hacia arriba y proporcional al radio del grano esférico, se opone al peso de éste, dirigido hacia abajo. El peso es proporcional al volumen del grano y, por ello, al cubo de su radio; la fuerza capilar predomina sobre el peso sólo si el grano suspendido es lo bastante pequeño (de tamaño inferior al milímetro). Una canica de vidrio jamás podrá suspenderse de otra de ese modo. En cambio, todos hemos comprobado que, al caminar sobre la arena con los pies mojados, la arena se nos adhiere; y cuanto más fina es esa arena, más se pega y más nos cuesta desprenderla.

El delicado arte de apisonar arena

La fuerza capilar explica por qué hay que mojar la arena y apisonarla para construir un castillo: la capilaridad aporta el ligamento necesario, cuya eficacia aumenta cuando el apisonamiento multiplica los contactos entre granos. Sin embargo, el arte de apisonar es delicado: mal ejecutado, aumenta el volumen de la arena en detrimento de la solidez. ¿Cómo es posible?

El frotamiento entre los granos se opone al deslizamiento de unos contra otros. Cuando sobre la arena se ejerce una presión, los granos, muy solidarios, ruedan y, por un efecto de engranaje, todo movimiento de uno de ellos repercute en los contiguos, y así sucesivamente. La presión ejercida para compactar los granos de una zona puede tener el efecto de desorganizar las zonas vecinas, que se vuelven menos compactas.

La experiencia confirma que es así. ¿No ha notado las aureolas que le rodean los pies al caminar por una playa empapada de agua? Compuestas de arena menos humedecida, seca incluso, esas aureolas desaparecen cuando cesa la presión del pie. Ello se debe a que la presión ejercida sobre los granos tiene como resultado que la arena que se encuentra alrededor del pie pierda compacidad. Al separarse los granos, el agua rellena los vacíos que se encuentran entre ellos. Así se deseca la arena de la superficie. Es, pues, ilusorio querer apisonar la arena presionando en una zona limitada de su superficie. Esta dificultad del apisonado se salva golpeteando la arena. Las vibraciones inducidas separan brevemente los granos unos de otros. No sometidos ya a fuerzas de rozamiento, los granos se reorganizan, se engrana mejor y así su densidad crece.

Volvamos a nuestro castillo. La obra en pie y esculpida, abandonamos la playa antes de que la arena se haya secado. Abandonada a su destino, e incluso en ausencia de balones destructores u olas rompientes, acaba por derrumbarse, es decir, por fluir. Si nada la toca, no se deshará más que al cabo de muchos meses. ¿Merced a qué prodigio? Al evaporarse, el agua de mar deja una sal que cristaliza y tiende "puentes de sal" entre los granos. Las obras ligadas por la sal conservan su forma. Esa misma adherencia explica que la arena que se nos pega a las piernas no se caiga espontáneamente después de secarnos.

No por eso dejan de ser frágiles estas construcciones. La sal cristalina no es un líquido y los puentes que forma nunca se reconstruyen espontáneamente. Pese a la sal del mar, al final no queda más que polvo.

BRUNO VACARO/*PLS*

Juan M.R. Parrondo

Cribas y números primos

Uno de los campos más fascinantes de la matemática es el estudio de los números enteros, la llamada *teoría de números*. Dentro de este campo, los números primos ocupan un lugar privilegiado. Su definición es extremadamente simple. Muchos estudiantes de primaria saben qué es un número primo e incluso pueden determinar si un número cualquiera lo es o no. Sin embargo, los números primos guardan secretos que sólo han podido revelarse mediante técnicas matemáticas muy refinadas y aún hoy plantean muchos desafíos. Un ejemplo clásico es la conjetura de Goldbach, que afirma que cualquier número par puede expresarse como la suma de dos primos (por ejemplo, 24 es 19 + 5). A pesar de la simplicidad de su enunciado, nadie ha podido aún demostrarla ni refutarla.

Pero los matemáticos sí han podido adentrarse en alguno de los misterios de los números primos. Por ejemplo, han estimado cuántos números primos hay entre 1 y n, una cantidad que suele denotarse por $\pi(n)$. Ya Euclides demostró que hay infinitos primos, es decir, que $\pi(n)$ crece indefinidamente. Pero, ¿cómo crece? O en otras palabras, ¿cómo están distribuidos los números primos? Por experiencia sabemos que su frecuencia disminuye: hay 168 entre 1 y 1000, 135 entre 1001 y 2000, 127 entre 2001 y 3000, o ya sólo 83 entre 405.001 y 406.000. El descenso es muy lento pero continuado. La *criba de Eratóstenes*, una de las formas clásicas de obtener una lista con todos los números primos, nos permite atisbar las razones de este descenso y de su lentitud.

La criba de Eratóstenes consiste en lo siguiente. Escribimos una lista con todos los números de 1 a N. A continuación tachamos los múltiplos de 2, es decir, los números pares. El primer número no tachado después del 2 es el 3. Tachamos entonces los múltiplos de 3. Buscamos el siguiente número no tachado, que es el 5, tachamos sus múltiplos, y así sucesivamente. De esta *criba* quedan unos pocos números no tachados, que son precisamente todos los primos del 1 al N. El resultado de la criba de los 50 primeros números se puede ver en la siguiente tabla, en donde se muestran en verde los números eliminados en la criba del 2, en naranja los del 3, en azul los del 5 y en rojo los del 7:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

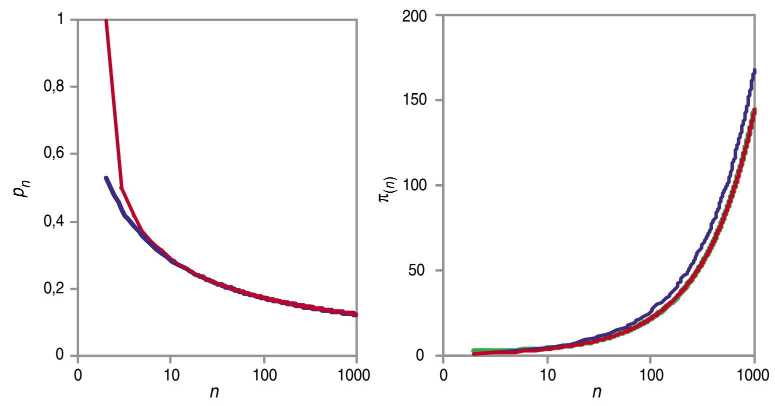
La criba de Eratóstenes nos indica por qué los números primos son más escasos cuanto más avanzamos en la lista. Un número alto puede ser tachado en cualquiera de las cribas de los primos menores que él. Por lo tanto, tiene más "probabilidad" de ser eliminado que un número bajo. Por ejemplo, el 49 se ha salvado de la criba del 2, 3 y 5, pero ha sido eliminado por la criba del 7. Por otra parte, las cribas cada vez eliminan menos números por dos razones: porque tachan menos números y porque las cribas anteriores ya han eliminado muchos de ellos. Es por tanto cada vez menos "probable" que las cribas de números altos eliminen nuevos números. He escrito las palabras "probabilidad" y "probable" entre comillas porque en las cribas de Eratóstenes no hay nada azaroso: se van tachando números en la lista de forma periódica, cada 2, 3, 5,... lugares. Sin embargo, el matemático David Hawkins tuvo la ingeniosa idea de modificar estas cribas de forma que sí fueran aleatorias, dando lugar a los *primos aleatorios de Hawkins*.

La *criba de Hawkins* funciona de la siguiente manera. Como en la de Eratóstenes, se escribe una lista con los números del 1 al N. El primer primo aleatorio es el 2. Lo llamaremos H_1. A partir del 2 tachamos cada número con una probabilidad 1/2, es decir, lanzamos una moneda en cada número para decidir si lo tachamos o no. Observen que el resultado de esta criba es similar a la de Eratóstenes. Si N es muy grande, habremos tachado aproximadamente la mitad de los números de la lista. Tomamos ahora el primer número mayor que 2 que no haya sido tachado. Será nuestro segundo primo H_2, que no tiene por qué ser el 3, ya que ha podido quedar eliminado en la criba aleatoria del 2. Supongamos que sí lo es, es decir, que $H_2 = 3$. La criba aleatoria correspondiente al 3 consiste en tachar cada número mayor que 3 con una probabilidad 1/3. Como se puede comprobar, en estas cribas aleatorias se tacha, de media, la misma cantidad de números que en las cribas de Eratóstenes, pero, en lugar de hacerlo de forma periódica, se hace de forma aleatoria. La criba continúa de la misma manera. H_3 es el siguiente número de la lista no tachado. Se toma como tercer primo aleatorio, se tachan los siguientes números de la lista con probabilidad $1/H_3$, y así sucesivamente. Los primos de Hawkins son realmente aleatorios, es decir, cambian cada vez que uno repite el proceso completo de criba. En la siguiente tabla pueden ver un ejemplo de criba de Hawkins hecha con los primeros 50 números. El código de colores es similar al de la criba de Eratóstenes: verde para los tachados en la criba de $H_1 = 2$, naranja para la criba del segundo primo H_2, que en este caso ha resultado ser el 3, azul para la de $H_3 = 5$ y rojo para la de $H_4 = 8$. Hemos necesitado un color más, el amarillo, para la criba del quinto primo $H_5 = 9$, que no aparecía en la de Eratóstenes:



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

Las tablas resultantes de las dos cribas son muy diferentes, pero comparten algunas características. En la de Eratóstenes hemos obtenido 16 primos, el primero ha eliminado 24 números, el segundo 7, el tercero 2 y el cuarto 1. En la de Hawkins hemos obtenido 14 primos, el primero ha eliminado 25, el segundo 5, el tercero 3, el cuarto 1 y el quinto 2. Los sucesivos primos cada vez eliminan menos números, porque tachan con menor frecuencia o probabilidad y también porque los primos anteriores han eliminado ya bastantes números, como ocurre en la criba de Eratóstenes. La criba de Hawkins reproduce, al menos de forma estadística, los aspectos fundamentales de la criba de Eratóstenes. ¿Podrá entonces ayudarnos a estimar $\pi(n)$? Sí, porque los primos aleatorios se distribuyen de forma parecida a los primos reales y es mucho más fácil calcular cuántos primos aleatorios hay.



En la gráfica de la izquierda se muestra la probabilidad p_n de que n sea primo aleatorio (*en rojo*) y se compara con la fórmula aproximada (*en azul*). En la gráfica de la derecha se muestra $\pi(n)$ (*en azul*), junto con el número medio de primos aleatorios (*en rojo*) y la conjetura de Gauss (*en verde*).

¿Cuál es la probabilidad p_n de que un número cualquiera n sea primo aleatorio? La probabilidad de que n sea primo es muy parecida a la de que lo sea $n+1$, puesto que ambos han sufrido las mismas cribas antes de llegar a la posible criba de n. Es más, si n resulta no ser primo, la probabilidad de que $n+1$ lo sea vale precisamente p_n. Por otro lado, si n es primo, $n+1$ sufrirá su criba y se tachará con una probabilidad $1/n$. En este caso la probabilidad de que $n+1$ sea primo es p_n, que es la probabilidad de serlo antes de la criba del n, multiplicado por $1 - 1/n$, que es la probabilidad de sobrevivir a la criba del n. Por otra parte, n es primo con probabilidad p_n y no lo es con probabilidad $1 - p_n$. Tenemos entonces la siguiente tabla de probabilidades:

n	$n+1$	Probabilidad
No primo	Primo	$(1-p_n)\times p_n$
Primo	Primo	$p_n \times p_n\left(1-\frac{1}{n}\right)$

Sumando la última columna, obtenemos la probabilidad de que $n + 1$ sea primo, independientemente de lo que haya sido n:

$$p_{n+1} = p_n\left(1-\frac{p_n}{n}\right).$$

Como $p_2 = 1$, podemos aplicar esta ecuación para obtener las distintas probabilidades p_n. Resulta $p_3 = 1/2$, como cabía esperar, puesto que el 3 sólo sufre la criba del 2; p_4 es $5/12 = 0{,}42...$, $p_5 = 215/576 = 0{,}37...$, etc. En la ilustración se pueden ver las probabilidades de ser primo aleatorio para los primeros 1000 números naturales. Encontrar una fórmula general para p_n no es posible; sin embargo, sí puede encontrarse una fórmula aproximada que es mejor cuanto mayor sea n. La fórmula es:

$$p_n \approx \frac{1}{\ln n + 1{,}2}$$

y se representa en la figura mediante la curva azul, que prácticamente es indistinguible de la roja para números n grandes. Los lectores con conocimientos avanzados de matemáticas pueden deducir esta fórmula aproximando la ley de recurrencia por una ecuación diferencial que se resuelve con facilidad (la constante 1,2 se calcula ajustando la solución a los valores reales de p_n). El número medio de primos aleatorios entre 1 y n será $\pi_{\text{aleat.}}(n) = p_1 + p_2 + ... + p_n$. Si ahora suponemos que los primos reales tienen una distribución parecida a la de los primos aleatorios, encontramos que:

$$\pi(n) \approx p_1 + p_2 + ... + p_n$$

y se puede demostrar que, para n muy grande, esta suma es aproximadamente $n/\ln n$. Este resultado, que $\pi(n)$ sea aproximadamente igual a $n/\ln n$ es uno de los teoremas fundamentales de la teoría de números. Se llama *teorema de los números primos* y fue intuido por Gauss y demostrado más tarde por Riemann. En la figura (*gráfica de la derecha*) se muestra el valor real de $\pi(n)$ junto con la conjetura de Gauss, $n/\ln n$, y $\pi_{\text{aleat.}}(n)$. Comprobamos que las dos últimas curvas prácticamente coinciden y subestiman ligeramente el valor real de $\pi(n)$, aunque esta discrepancia se hace cada vez menor a medida que aumenta n.

La demostración del teorema de los números primos es muy técnica. Sin embargo, la criba de Hawkins ha permitido obtener el mismo resultado de una forma más sencilla, aunque no rigurosa. Más aún, la criba de Hawkins nos proporciona una imagen de por qué los números primos se hacen cada vez más escasos y por qué lo hacen de forma tan lenta. Sanjoy Mahajan, que ha escrito en Caltech una muy recomendable tesis doctoral sobre cálculos de orden de magnitud en física que incluye un estudio detallado de los primos aleatorios, considera a éstos un *modelo* de los primos reales, es decir, una versión simplificada de los primos reales que, sin embargo, conserva sus principales características. En esta sección hemos visto en ocasiones modelos matemáticos sencillos de sistemas físicos, económicos o sociológicos. ¡Más sorprendente es que haya *modelos* matemáticos para conceptos también matemáticos!

Mark Fischetti

FOTOGRAFIA DIGITAL

Píxel a píxel

Las cámaras digitales vienen con un sinfín de funciones accesorias. Pero lo que más importa sigue siendo la calidad de la imagen, que ha mejorado de forma notable merced a los captadores de última generación.

En vez de incidir sobre una película virgen, la luz que penetra en una cámara digital se enfoca sobre un dispositivo de acoplamiento por carga, o CCD. Esta matriz semiconductora, que consta de multitud de diminutos elementos de imagen (píxeles), transforma la energía lumínica en eléctrica (los fotones que llegan provocan la liberación de electrones). Un microprocesador interpreta como señal digital la carga de cada píxel y construye una imagen de la escena.

Pero los CCD y el ojo humano no operan del mismo modo. Del buen enfoque, la corrección cromática y la luminosidad depende que en la cámara se formen imágenes fieles de las que vemos con nuestros ojos. Entre lentes esféricas comunes se intercalan lentes asféricas (de curvatura no esférica), para que la luz quede uniformemente enfocada sobre todos los píxeles; ello mejora la nitidez. Los filtros colocados delante de cada píxel aseguran que los algoritmos de procesado de los colores generen colores naturales y luminosos. Otros algoritmos detectan posibles distorsiones en la longitud de onda de la luz entrante; éstas pueden deberse a la fluorescencia, que da un tono verde, o a una iluminación de tungsteno (incandescente), que da un tono amarillo. La eliminación de esos matices —que en nuestro cerebro ocurre de forma automática—, confiere a la imagen el color y la blancura esperados.

En las cámaras digitales más modernas se minimizan también los problemas prácticos de los modelos primitivos. El *zoom* óptico, que se lograba moviendo el objetivo, estaba limitado en aras de la compacidad de la cámara; el *zoom* digital aumenta el alcance del óptico mediante un procesado informático. El aumento de la velocidad de los microcircuitos de procesado digital de imágenes ha acortado el tiempo entre disparos —indicativo de la rapidez con que la cámara puede tomar fotogramas en sucesión— hasta 1,6 segundos o menos.

El tiempo de captura —retardo entre el instante en que se pulsa el obturador y el instante en que se abre el diafragma para capturar la imagen— se ha reducido también hasta dejarlo en medio segundo o menos, primordialmente acelerando el enfoque automático.

1. EN UNA CAMARA DIGITAL, las lentes enfocan la luz sobre un dispositivo de acoplamiento por carga (CCD, "charged-coupled device"), que transforma la luz en carga eléctrica. Esta información se envía entonces a una memoria intermedia. El procesador accede a esos datos, reduce el ruido de la señal, corrige el color y la blancura y, por fin, envía la imagen digital resultante a una memoria interna o a una tarjeta de memoria.

Flash

Tarjeta de memoria

Haz infrarrojo

Rayos de luz ambiente

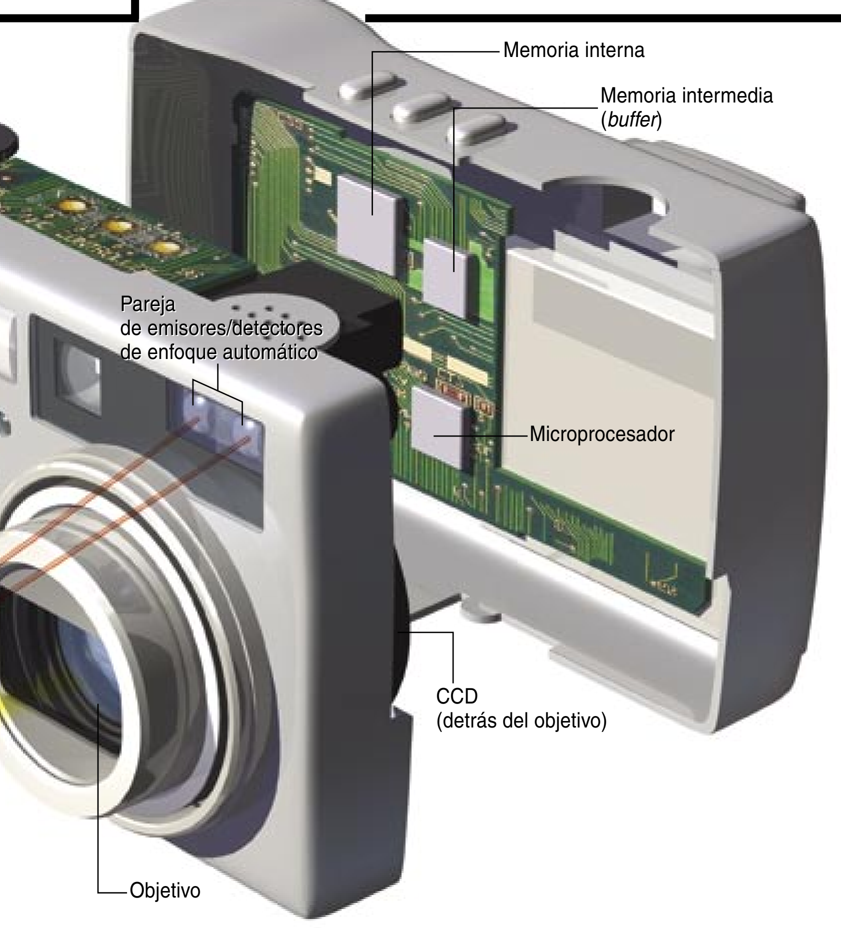
FUENTE: EASTMAN KODAK COMPANY; GEORGE RETSECK (*ilustraciones*)

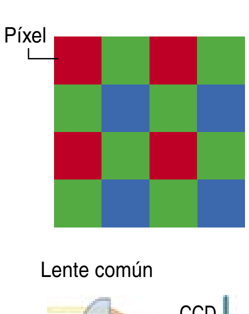
2. LENTES ASFERICAS (*derecha*) se intercalan entre lentes esféricas para corregir la distorsión. Las lentes esféricas no enfocan los rayos de luz paralelos que inciden en los bordes exteriores de la lente y confieren borrosidad a la imagen (*diagramas*). En este caso, el primer grupo de elementos ópticos canaliza los rayos hacia el segundo grupo, que avanza o retrocede según lo requiera el enfoque o el *zoom*. El segundo grupo estrecha la luz hacia el tercero, que es fijo; éste dirige por fin los haces luminosos sobre el CCD.

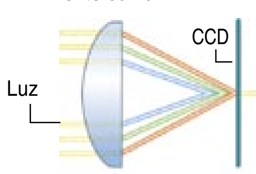
➤ **MEGAPIXELES:** Una cámara de cuatro megapíxeles está equipada con un CCD de cuatro millones de píxeles. Cuanto mayor sea esa resolución, más nítida será la fotografía. Pero los objetivos asequibles económicamente no descomponen la luz en más de seis u ocho megapíxeles. Por tanto, una cámara de 10 o 12 megapíxeles no crea una imagen globalmente más nítida. Sin embargo, una cifra elevada de píxeles sí mejora la nitidez de las imágenes tomadas con el *zoom* digital.

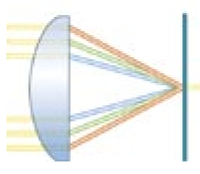
➤ **EN PEQUEÑO:** En la mayoría de las cámaras digitales, la "foto" se crea en formato jpeg ("Joint Photograph Experts Group"), norma gráfica de uso generalizado en ordenadores e Internet. Lo que vemos en la pantallita de cristal líquido de la cámara corresponde a una versión reducida de la imagen. Esta miniatura contiene unos 150.000 octetos (bytes) de datos; se conoce como archivo de 150 k.

➤ **ENFOQUE RAPIDO:** Para el enfoque automático, muchas cámaras se sirven de CCD externos que captan la luz ambiente. El procesador evalúa primero la carga de los CCD y estima la distancia por triangulación. Mueve luego el objetivo y repite el proceso hasta hallar la posición correspondiente a la carga máxima. Se abre entonces el diafragma. El procesador afina el enfoque por muestreo del CCD principal, responsable de la formación y grabación de imágenes; merced al enfoque aproximado anterior, este procedimiento requiere menor número de ciclos que en los modelos más antiguos (que empleaban sólo el CCD principal), con lo que el enfoque automático se acelera.

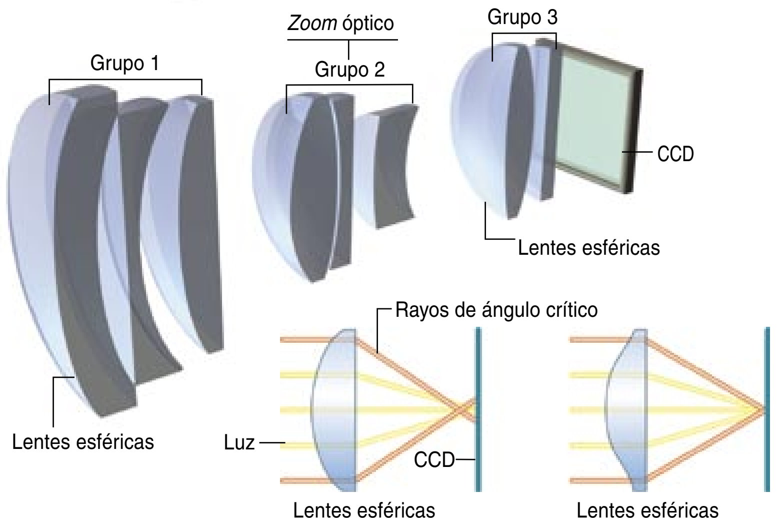


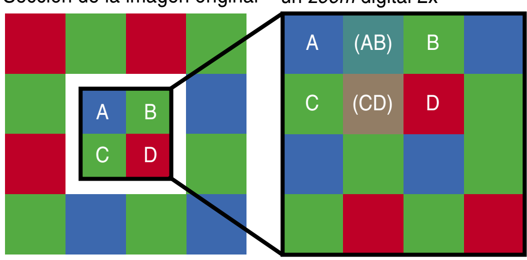






3. FILTROS DE COLOR cubren los píxeles de un CCD, convirtiéndolos en monocromáticos (cada uno registra un solo color). La mayoría de las cámaras emplean filtros tipo Bayer, tal como se muestra; predomina el verde porque el ojo es más sensible a esa longitud de onda. El procesador combina las señales rojo-verde-azul para formar una imagen a todo color. Nuevas lentes de baja dispersión (*diagramas*) contribuyen a reducir las imprecisiones cromáticas debidas a las diferencias en el punto de enfoque de las distintas longitudes de onda.





4. EL *ZOOM* DIGITAL opera cuando el objetivo se halla desplegado al máximo; amplía así el alcance del *zoom* óptico. Con un *zoom* digital 2x, el procesador genera por interpolación una cantidad de píxeles correspondiente al 50 por ciento de la imagen original (con un *zoom* 4x, al 25 por ciento): ubica los píxeles conocidos (*A* y *B*, por ejemplo) en un retículo que llena todo el fotograma; a partir de éstos interpola el color de los píxeles intermedios (*AB*). La presencia de estos píxeles estimados rebaja la nitidez de la imagen.

Revolución científica

Protoquímica

METHODS AND STYLES IN THE DEVELOPMENT OF CHEMISTRY, por Joseph S. Fruton. American Philosophical Society; Philadelphia, 2002.

DISTILLING KNOWLEDGE. ALCHEMY, CHEMISTRY AND THE SCIENTIFIC REVOLUTION, por Bruce T. Moran. Harvard University Press; Cambridge (Mass.), 2005. A PHILOSOPHICAL PATH FOR PARACELSIAN MEDICINE. THE IDEAS, INTELLECTUAL CONTEXT, AND INFLUENCE OF PETRUS SEVERINUS: 1540-1602, por Jole Schackelford. Museum Tusculanum Press; Copenhague, 2004.

PROMETHEAN AMBITIONS. ALCHEMY AND THE QUEST TO PERFECT NATURE, por William R. Newman. The University of Chicago Press; Chicago, 2004.

GEORGE STARKEY. ALCHEMICAL LABORATORY NOTES AND CORRESPONDENCE. Edición preparada por William R. Newman y Lawrence M. Principe. The University of Chicago Press; Chicago, 2004

En las postrimerías de la Edad del Bronce, a finales del segundo milenio antes de la era cristiana, los egipcios del Tell el-Amarna fabricaban vidrios de colores. Sus hornos alcanzaban las temperaturas necesarias para fundir la sílice de los guijarros de cuarzo que mezclaban con cenizas de plantas ricas en sosa. Otros remontan incluso mil años más los inicios de la fabricación del vidrio y le atribuyen a los hebreos su invención. En cualquier caso, se trata de uno de los primeros hitos de la química.

La historia recibida gusta, sin embargo, de otorgar a la Grecia jónica del siglo VII los primeros indicios del conocimiento y manejo de los elementos componentes de la materia (*Methods and Styles in the Development of Chemistry*). Del trato cotidiano con la realidad empírica, los filósofos presocráticos irían extrayendo los conceptos de sustancia, elemento, principio y átomo. Y así se desgranó un rosario de constituyentes últimos: agua (Tales), *apeiron* o una suerte de aire húmedo (Anaximandro), *pneuma* o aliento (Anaxímenes) y, por fin, los cuatros elementos (Empédocles), dos que tienden hacia arriba (aire y fuego) y otros dos que se hunden (agua y tierra). La teoría de los cuatro elementos, incorporada en la física aristotélica, rivalizará, andando el tiempo, con el planteamiento atomista de los seguidores de otro griego insigne, Demócrito.

De la tradición metalúrgica y tintorera —industria de primer orden en el mundo clásico— se hacen eco Plinio el Viejo y Bolos de Mendes. A este último en particular se le atribuyen los primeros trazos de la práctica alquimista. Desde el siglo IV de nuestra era, desde Zósimos, los procedimientos, el instrumental y una concepción hermética del mundo van sentando las bases de un arte que nos llegará a través de la traducción de los libros griegos o coptos al árabe. Sobresale la figura avanzada de Jabir ibn Hayyan (el Geber de los latinos). Consideró que "azufre" y "mercurio" constituían el sustrato postrero de todos los metales. Pensó que el oro, el metal más perfecto, resultaba de la combinación de formas "puras" de ambos.

Con la traducción de los textos árabes al latín, la alquimia inició un recorrido plurisecular (*Promethean Ambitions. Alchemy and the Quest to Perfect Nature*). Ese remedo de los procesos escondidos de la naturaleza no presenta todavía una connotación directa con la terapéutica, sino con la transmutación de los metales, vinculación expresada ya en sus sinónimos clásicos de *chrysopoeia*, o arte de la fabricación del oro, y *argyropoeia* (fabricación de plata). En el empeño medieval por llegar, a través de la destilación, a la sustancia más pura y, a la postre, a la quintaesencia, destacaron Roger Bacon, Raimundo Lulio y Juan de Rupescissa (*Distilling Knowledge. Alchemy, Chemistry, and the Scientific Revolution*). Les guiaba, en el mismo anhelo, la obtención de un remedio poderosísimo, un elixir o *aqua vitae* que purificara de sus impurezas a los cuerpos, les sanara de las enfermedades y prolongara la vida.

Bacon, el de mayor fuste teórico, veía en la alquimia la ciencia que se ocupaba de la generación de las cosas a partir de sus elementos. Rupescissa nos legó un valioso *Libro sobre la contemplación de la quintaesencia de todas las cosas*. Asimilaba la quintaesencia a la materia integrante de las esferas celestes. Por fin, amparándose en el nombre de Lulio se tejió una tradición alquimista apócrifa de aparente escaso nivel, aunque está todavía por estudiar. En el *Codicillus*, se comparaba la generación humana con un proceso de trabajo alquímico en cuatro fases y se admitía una íntima correspondencia entre el macrocosmos y el microcosmos.

La destilación no suponía ninguna innovación. La cuenca mediterránea había venido destilando alcohol desde 1100 por lo menos. Nos lo ratifica Pedro Hispano en su *Tratado maravilloso de las aguas*. Había algo sorprendente en las propiedades del alcohol: "agua" que ardía (una contradicción física), prolongaba la vida (retrasaba la degradación de la muerte a los organismos sumergidos en él) y disolvía resinas y aceites esenciales, insolubles en agua. A este respecto, las fuentes antiguas aportan abundante información sobre destilados minerales, repartidos entre "aguas" (*aqua fortis* o ácido nítrico) y "aceites" (aceite de vitriolo o ácido sulfúrico).

Junto a la teoría del azufre-mercurio sobre el origen de los metales y

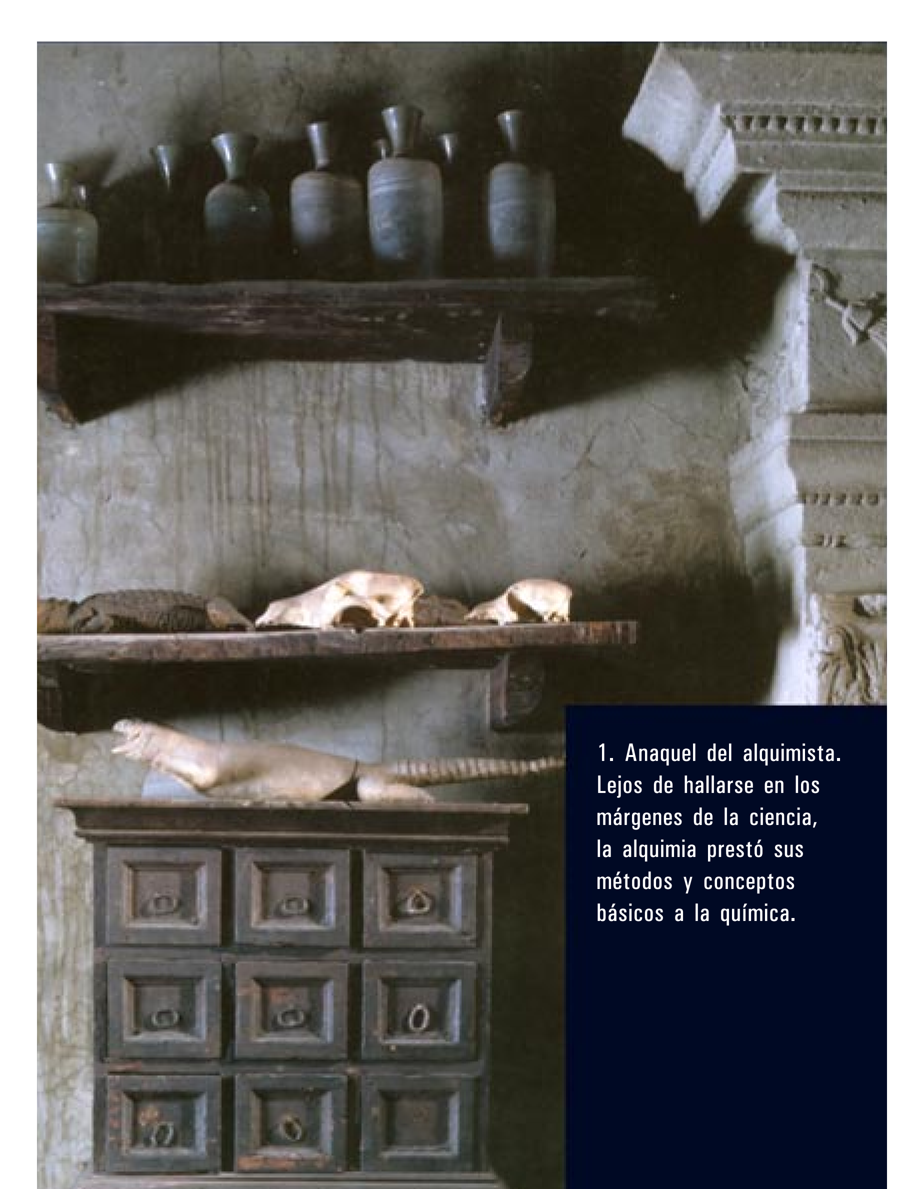
minerales, al Renacimiento llega la idea de su actividad y crecimiento. La actividad se refleja en la transmutación natural: los metales del subsuelo, dejados a su arbitrio, tienden a la pureza y, con el tiempo, hacia el oro o la plata. Con la perspectiva de ese refinamiento, el alquimista se propone acelerar el proceso a través de un catalizador ideal (piedra filosofal, elixir de la vida). Disponían de alambiques, cucúrbitas, retortas y hornos. En su *Libro sobre el arte de la destilación* (1500), Hieronymus Brunschwig definía la destilación como la purificación de lo basto a partir de lo sutil y lo sutil a partir de lo basto, con la idea de que lo corruptible se haga incorruptible.

De la habilidad técnica de esos químicos nos habla Leonardo da Vinci. En sus cuadernos recién recuperados, reseña la separación del oro y la plata por medio del ácido nítrico, la pintura del oro (método para conseguir que la aleación brille como el oro puro) y el método alquímico de cementación. Este constituía un procedimiento antiguo en el que se alternaban láminas de una aleación de oro con capas de sal (o salitre), polvo de ladrillo (un silicato), vitriolo y, quizás, alumbre. Cambiar la apariencia de los metales formaba a menudo parte de la tarea del artista. Contemporáneo de Leonardo, Vanoccio Biringuccio, autor de una influyente *De la pirotechnia*, negaba la posibilidad de obtención de oro. Negaba a la alquimia capacidad para remedar los procesos de las entrañas de la Tierra. Le llamó la atención la ganancia de peso de los metales cuando se calentaban en el horno; el plomo, por ejemplo, al calentarlo producía unas cenizas (una "cal") y su peso crecía entre un 8 y un 10 por ciento.

La investigación reciente ha sacado a la luz también un extenso conocimiento compartido en Europa sobre sustancias tintóreas a lo largo del siglo XV. Las primeras biblias se decoraron con diversos pigmentos: rojo (cinabrio o sulfuro de mercurio), azul (azurita, un carbonato básico de cobre), verde aceituna (malaquita, otro carbonato básico de cobre), verde obscuro (verdigris, un compuesto órgano-cúpreo), amarillo (óxido de plomo-estaño), negro (carbón) y blanco (carbonato cálcico). Algunos ejemplares alemanes contienen un pigmento muy caro, la lazurita (lapislázuli).

La traducción contemporánea de manuscritos herméticos por Marsilio Ficino, cuya versión comentada del *Pinander* apareció en 1471, condicionó el entramado teórico de la alquimia. Los planetas (que incluían el Sol y la Luna), junto con los signos del zodíaco, influían en la Tierra y lo en ella contenido. Las personas poseían alma divina, pero en cuanto seres físicos se hallaban sometidos a las estrellas. Ese espíritu lo encarnó perfectamente Theophrastus Bombastus Aureolus Philippus von Hohenheim, Paracelso, quien se aplica, sobre todo, a la transmutación, secreto en el que le introduce su propio padre, según cuenta en *Cirugía magna*. La transmutación implicaba bastante más que convertir el metal base en oro; en *Sobre la naturaleza de las cosas* expone que se produce cuando una cosa pierde su forma y figura y se transforma en algo nuevo, que ya no recuerda su estructura de origen.

Sustituyó los cuatro elementos de los griegos por tres principios, los *tria prima*: azufre, sal y mercurio, que eran a un tiempo categorías simbólicas y componentes elementales de la materia. La sal representaba tierra incombustible, no volátil; el azufre, la naturaleza combustible; el mercurio, el constituyente volátil y metálico de los cuerpos. En la separación residía el quicio de cuanto existe, incluida la propia creación universal. En su primer acto, Dios dividió la luz de la obscuridad. No otra cosa que *ars separatoria* era el *ars spagyrica*. Tras establecer en *Paragranum* ("más allá de la semilla") que la medicina descansaba sobre los cuatro pilares de la filosofía, astronomía, alquimia y la virtud del médico, formuló en *Opus paramirum* ("una obra más allá de lo admirable") su nueva concepción de la enfermedad y del tratamiento médico. Frente a la teoría humoral, profesó que cada órgano del cuerpo contenía un *archeus* que operaba como un alquimista interno y se ocu-



1. Anaquel del alquimista. Lejos de hallarse en los márgenes de la ciencia, la alquimia prestó sus métodos y conceptos básicos a la química.



2. Cerámica en que se hallan incluidas serpientes, ranas, salamandras y un sinfín de especies más. Se supone que pertenecía al taller de Bernard Palissy.

paba del funcionamiento adecuado del órgano. Si fallaba ese alquimista interno, se producía la enfermedad del órgano afectado.

Paracelso veía en el cuerpo humano la síntesis de todas las fuerzas del universo. Proponía que las emanaciones astrales presionaban sobre animales, vegetales y minerales, vale decir, les imprimían sus "signaturas". El hombre tenía así una triple vida: mortal, igual que cualquier cuerpo físico, inmortal, que correspondía al alma, y "astral", propia de su "espíritu sidéreo". Esta tercera vida constituía el nexo entre mente y materia. Plantas, animales, minerales y metales poseían, todos, un cuerpo astral, que se originaba en las estrellas y que especificaba la forma y función de cada entidad individual. Era este espíritu el que representaba el alquimista interno, el *archeus*. Aunque todas las cosas poseían espíritu astral y servían, pues, de potencial fármaco, los remedios más eficaces se confeccionaban a partir de metales y minerales porque éstos se relacionaban mejor con las categorías de enfermedad; eran éstas salinas, sulfurosas o mercuriales.

Buena parte de esa doctrina paracelsista hubiera quedado ahogada en un lenguaje indescifrable de no haber mediado Johannes Guinther de Andernach, traductor de Galeno y maestro de Andrés Vesalio, y Peter Severinus (*A Philosophical Path for Paracelsian Medicine. The Ideas, Intellectual Context, and Influence of Petrus Severinus: 1540-1602*). Ambos sistematizaron el pensamiento de Paracelso, amén de ofrecerle un respaldo académico de respetabilidad. La *Idea medicinae philosophicae* (1571) de Severinus depura los conceptos fundamentales de la medicina paracelsista, que entronca con el pensamiento neoplatónico e hipocrático. En el núcleo de esa síntesis se encuentra la doctrina de los *semina*, vale decir, la explicación de los lugares de generación y corrupción de toda realidad física; en ese marco debe interpretarse la individualidad ontológica de ciertas enfermedades. La tesis de las "semillas de la enfermedad" (*semina morborum*) caló en la medicina posterior y se convirtió en uno de los elementos precursores de la patología moderna.

Su compatriota y coetáneo Tycho Brahe instaló en Uraniborg un laboratorio químico que rivalizó con los de los reyes y príncipes renacentistas; en cortes alemanas, en la de Praga, la de París o la de nuestro Felipe II las prácticas paracelsistas gozaron del privilegio real. Astronomía y química "o astronomía celeste y astronomía terrestre", según las llamaba Tycho formaban una singular visión unitaria del mundo que Tycho compartía con Severinus. Pero éste recibió críticas acerbas de Andreas Libavius, autor del primer manual de historia de la química. En *Alchymia* (1597), tal era su título, detallaba la composición y las propiedades de los cuerpos, amén de su purificación a través del fuego. Describía las técnicas de ensayo, el análisis de minerales y metales y, a partir de ellos, la preparación de medicinas. Introducía métodos cuantitativos para la determinación de aleaciones. Defendía el arte de la transmutación y reflexionaba sobre la piedra filosofal; explicaba los secretos de los jeroglíficos, enigmas y símbolos antiguos. Al abordar la obtención de sustancias magistrales, apelaba a la destilación.

En el siglo XVI, el arte de la destilación no había entrado todavía en la universidad. Constituía, empero, un saber muy difundido a través de recetarios cuyo índice crecía a cada nueva edición. Los libros se dirigían a alquimistas, barberos, apotecarios y amas de casa. Bastaba un utillaje modesto para llevar las prescripciones a la práctica. Mas, de forma paulatina, empezaron a tenderse puentes entre el mundo académico y el menestral. Fenómenos como el de la calcinación despertaron el interés de los docentes de filosofía natural. Una de las obras que más hicieron por elevar el nivel teórico del beneficio de la mina y el tratamiento de los metales fue *De re metallica* (1556) de Georgius Agricola. Se requería, no obstante, un esfuerzo institucional. Vendría del campo de la medicina

y lo prestó, en Alemania, Zacharias Brenel, de la Universidad de Jena, y, en España, Llorenç Coçar, de la Universidad de Valencia.

La iatroquímica se asentó en el siglo XVII. Uno de sus principales proponentes, Jean Baptiste van Helmont, seguía la tradición de Paracelso, mediada por Severinus, con numerosas reservas. Rechazó la doctrina de los cuatro elementos y la tríada paracelsista (azufre, mercurio, sal). Como elementos genuinos propuso el aire y el agua. Admitía la intervención de un espíritu vital en la naturaleza. Todas las cosas procedían de semillas espirituales, o *semina*, plantadas en agua elemental. La semilla poseía la fuerza vital de animales, vegetales y minerales. Por medio de un fermento, que determinaba la forma, función y dirección de todo cuanto existe, la semilla transformaba el agua en un ente individual.

Para encontrar las semillas invisibles de los cuerpos, van Helmont exploró el humo que emergía de sólidos y fluidos en combustión. A este humo específico (que difería del aire y contenía la esencia de su sustancia material primigenia) lo denominó gas. Igual que la idea de semillas espirituales, el "gas" constituía otro ejemplo de conexión entre acción divina y realidad física. Interesado por la transmutación de los metales y los procedimientos del *ars separatoria*, tomó de Paracelso el *liquor alkahest*, un disolvente incorruptible que podía reducir cualquier cuerpo a su materia primera. Un compuesto tratado con alkagesto se resuelve primero en sus constituyentes; tratados luego éstos, se reducen a un agua primordial. La actividad del alkagesto no mengua con el proceso de disolución. Van Helmont sugirió, además, que la fermentación explicaba la digestión. Aunque debida en última instancia a una fuerza espiritual, venía condicionada por la operación de los ácidos en el cuerpo e, indirectamente, por la presencia de álcali. Así nació una nueva visión de los componentes básicos de la operación química del cuerpo: la teoría ácido/alcali.

La promesa de una química aplicada al progreso social no estaba restringida al Viejo Mundo. En el Nuevo se había desarrollado una floreciente industria del hierro en Nueva Inglaterra. De la colonia llegó a Europa uno de los puntales de la revolución científica, maestro de Robert Boyle. Nacido en las Bermudas, George Starkey se sabía heredero de la tradición alquimista (*George Starkey. Alchemical Laboratory Notes and Correspondence*). Ese legado abarcaba métodos (destilación, sublimación, calcinación, lixiviación, etcétera) y productos (tinturas, pólvora, licores alcohólicos, piedras preciosas, perfumes, aceites esenciales y pigmentos).

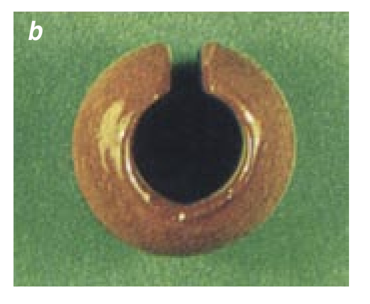
El lenguaje críptico y simbólico de las expresiones alquimistas supone un obstáculo insuperable, salvo por los *adepti*. Un secretismo buscado, sobre todo, cuando el texto entraba en el terreno de la *chrysopoeia*. De semejante escollo imponente para los historiadores de la química vienen a liberarnos con su nuevo trabajo conjunto Newman y Principe. En los cuadernos de laboratorio de Starkey aparecen los pasos dados en la búsqueda de arcanos químicos: la piedra filosofal y el mercurio filosófico, el alkagesto, los álcalis volátiles, los metales de Suchten, el *mercurius vitae* y el cinabrio de antimonio.

Agente de la transmutación metálica, creíase que la piedra filosofal constituía una sustancia densa, de efectos prodigiosos. Variaba en color; si roja, producía oro, si blanca, plata. En un proceso de múltiples pasos hasta dar con ella, se empleaban, por metales de partida, el plomo, el estaño o el mercurio y, menos frecuentemente, debido a su mayor resistencia a la fundición, hierro o cobre. Starkey pertenecía a la escuela mercurialista, que partía del mercurio y el oro. No se trataba de mercurio común (el de los termómetros), sino de mercurio "filosófico", producido en el laboratorio. Starkey "corregía" el mercurio común con régulo de antimonio.

Aunque su discípulo Robert Boyle abominaba en *The Sceptical Chymist* (1661) de los que todavía se aferraban a los cuatro elementos o la tríada paracelsista y declaraba su incapacidad de comprobar el princi-

3. Botones de oro rosa procedentes de la tumba de Tutankamon (*arriba*). Collar romano de esmeraldas artificiales (*derecha*).





4. Anilla para el cabello o pendiente del antiguo Egipto de jaspe auténtico (*a*) y de cerámica vidriada, imitando el jaspe (*b*).

pio helmontiano de la reducción de metales y minerales a agua (alkagesto), dejará el esbozo de su química para *Some Considerations Touching the Usefulness, of Experimental Natural Philosophy* (1663). Propio de la química es, para Boyle, extraer las partes más activas de los cuerpos y enriquecer las virtudes de las medicinas, pues la fisiología descansaba en la química. Esta debía participar, con pleno derecho, en el desarrollo de una genuina filosofía natural. Boyle, adscrito a la filosofía corpuscular, atribuía las diferencias entre substancias a los tamaños, configuraciones y movimientos de las partículas componentes de un cuerpo.

Desde 1658, Franciscus de la Boë (Sylvius) enseñaba en Leyden una medicina química, heredera de la iatroquímica de Paracelso y van Helmont, que explicaba todos los procesos del cuerpo a través de la interacción entre ácido y álcali, a su entender los principios fundamentales de la naturaleza. (Boyle defendió que algunas sustancias no eran ácidos ni álcalis, sino neutras.) Supuso Sylvius que el proceso de fermentación resultaba esencial para la digestión e incluso clasificó los humores y enfermedades de acuerdo con su acidez.

De la sombra del paracelsismo empieza a liberarse Nicolas Lemery, a caballo entre la iatroquímica y la química stahliana del flogisto. En medio, Christophe Glaser, quien en 1663 publicó un *Traité de la Chymie* (1663), cuyas enseñanzas se limitan a lo por él experimentado. Entiende la química como un arte por el que se aprende a disolver los cuerpos hasta llegar a sus componentes y ensamblar éstos para formar otros cuerpos. Glaser distingue cinco principios en la reducción de los mixtos: tres activos (el espíritu o mercurio, el aceite o azufre y la sal) y dos pasivos (el agua o flema y la tierra).

En su *Cours de Chymie* (1675), Lemery presentaba un sistema basado en la filosofía mecanicista, a cuyo servicio pone la teoría ácido/alcali. En concreto, las partículas ácidas poseen puntas aguzadas que penetran en los cuerpos porosos de las partículas álcalis cuando entran en contacto. Lo mismo que Glaser, en cuyo tratado se espeja, concedía que los mixtos constaban de cinco principios químicos: espíritu, óleo, sal, agua y tierra. A uno se les llama activos porque, hallándose en agitado movimiento, operan toda la acción del compuesto; en tanto que los pasivos, encontrándose en reposo, se limitan a detener los principios activos. El espíritu o mercurio es el primero en aparecer en el análisis químico; se trata de una sustancia sutil, penetrante, ligera, que está en mayor agitación que los demás. El aceite o azufre, que debe su nombre a su carácter inflamable, es una sustancia dulce, sutil, untuosa, que aparece después del espíritu. Ultima en aflorar, es la sal una sustancia incisiva y penetrante que confiere consistencia y pesantez al compuesto. Según él, la química nos enseña de qué modo las aguas vitriólicas y metálicas se coagulan en las entrañas de la Tierra y crean los minerales y los metales de acuerdo con las diversas matrices que encuentran. A través de los procesos químicos de fermentación y sublimación adquirimos una idea clara de la vegetación y del crecimiento de los animales.

A finales del siglo XVII, cientos de sustancias, sólidos clasificados como "tierras" (metales, minerales, sales, álcalis), líquidos tales como "aguas" o "aceites" y material vaporoso ("espíritus", "esencias"), habíanse ya identificado y recibido nombre por un ejército de metalúrgicos, herreros, joyeros, farmacéuticos, etcétera, muchos de ellos alquimistas. Los símbolos astrológicos para las siete estrellas "errantes" se asignaban al oro (círculo), plata, cobre, hierro, plomo, zinc y mercurio. Se idearon símbolos similares para los "elementos" recién descubiertos y otros materiales conocidos, como sosa, potasa, caliza, salitre, bórax y magnesia.

Con un fuerte calentamiento al aire ("calcinación"), un metal se convertía en una "cal", a partir de la cual podía recuperarse de nuevo por "reducción" (también llamada revivificación). La combustión de muchos materiales extraídos de fuentes minerales, vegetales y animales producían una emisión de vapores; éstos, condensados, se sometían a un proceso de destilación. Las soluciones acuosas de algunos de tales vapores se parecían al vinagre, el producto final volátil "ácido" de la fermentación del vino. No era infrecuente percatarse, en el curso de las destilaciones, de que tras la emisión de "espíritus" solubles en agua aparecía un producto final oleoso e insoluble en agua, inflamable. Algunas sustancias (en particular la sal amoniacal) se sublimaban en las paredes del vaso de destilación. Lo que quedaba en el fondo, en forma sólida, representaba material "fijo" o una "tierra".

Se sabía que los ácidos provocaban una efervescencia cuando se agregaban a ciertas sales y que tornaban, en azules, flores rojas. La balanza se empleaba también, especialmente por los que trabajaban el oro y la plata. Se sabía también que ambos se separaban por medio de la "aqua regia", una mezcla del "espíritu de sal" y "espíritu de nitro", Las sales solían purificarse por cristalización. Por tanto, la descomposición de un material químico por combustión representaba el método principal del análisis "en seco" (separación de las partes); junto con algunos métodos "húmedos" de comprobación de la solución, marcó el comienzo de lo que ahora es la química analítica. Del mismo modo, la formación de nuevos productos mediante la interacción de dos sustancias conocidas instauró la "síntesis".

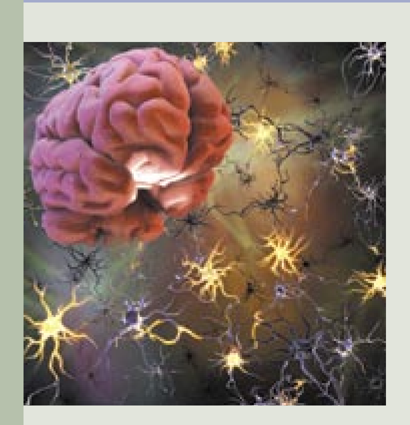
Las teorías asociadas a los ácidos y álcalis siguieron en primer plano durante años. Georg Stahl abogaba por la existencia de un ácido universal y consideraba que las sales eran mezclas de ese ácido con una o más de las tres clases de tierras. Las ideas de Stahl influyeron en Wilhelm Homberg, quien aportó técnicas cuantitativas al problema ácido/álcali. Midió la intensidad relativa de los ácidos y álcalis por métodos químicos y físicos. A pesar de la creciente hostilidad a las declaraciones alquímicas, se esforzó por elaborar una teoría de la materia constituida por partes sutiles, o corpúsculos, con la teoría medieval de azufre-mercurio. Para muchos, sin embargo, la química del siglo XVIII fue en buena medida la del flogisto. A ese ente de peso negativo se le concedía la facultad de la combustión. Los cuerpos aumentaban de peso cuando se perdía el flogisto. Esta teoría, levantada por Becher y Stahl, se vio arruinada por Antoine Lavoisier.

—LUIS ALONSO



¿PODEMOS ENTERRAR EL CALENTAMIENTO GLOBAL?, por Robert H. Socolow

Bombear dióxido de carbono bajo tierra para evitar el calentamiento atmosférico resulta factible, pero sólo si se superan varias dificultades.



NUEVA PERSPECTIVA PARA LA ENFERMEDAD DE PARKINSON, por Andrés M. Lozano y Suneil K. Kalia

Los últimos descubrimientos genéticos y celulares permitirán desarrollar mejores tratamientos para este trastorno del sistema nervioso, cuya incidencia es cada vez mayor.



ASI SE DESARROLLARON LOS DINOSAURIOS, por John R. Horner, Kevin Padian y Armand de Ricqlès

De la estructura de los huesos de los dinosaurios se infieren la edad y la tasa de crecimiento de aquellos gigantes.



SUPERVIENTOS GALACTICOS, por Guillermo Tenorio Tagle, Casiana Muñoz Tuñón, Verónica Melo y Sergiy Silich

La energía originada por múltiples e intensos brotes de formación estelar se autocolima y desencadena vientos galácticos, que fluyen hasta el medio intergaláctico.



LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN, por David Kaiser

En manos de la primera generación de físicos de la posguerra, una herramienta ideada para sacar a la electrodinámica cuántica del callejón sin salida en que se hallaba, transformó la física.